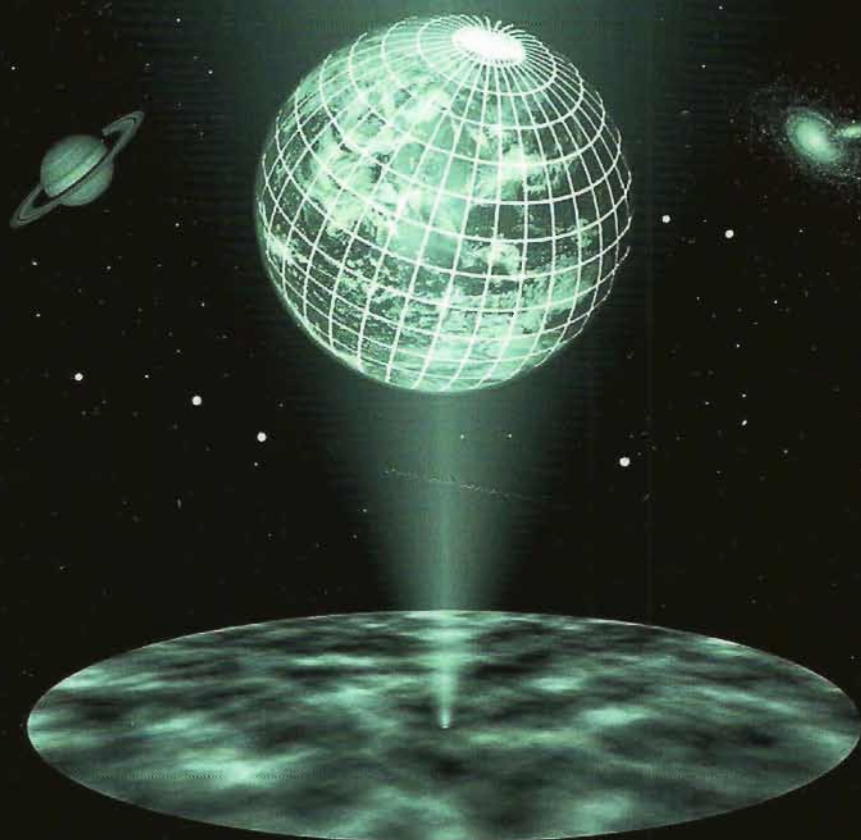


El universo holográfico

Desentrañando la naturaleza
del espacio y el tiempo



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmormoreau.blogspot.com/>

El universo holográfico

Desentrañando la naturaleza
del espacio y el tiempo

RBA

Imagen de cubierta: Universo surgiendo de un plano bidimensional.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Eduardo Arroyo Pérez por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2017, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: NASA: 19; NASA, ESA y D. Coe, J. Anderson y R. van der Marel
(Space Telescope Science Institute): 139; NASA GSFC/J. Schnittman: 138-139;
Universidad Técnica de Viena: portada; Andrzej Wojcicki/SPL/Age Fotostock: 143.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de
esta publicación puede ser reproducida, almacenada
o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8828-8

Depósito legal: B-8277-2017

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - Printed in Spain

SUMARIO

| | |
|-----------------------|---|
| INTRODUCCIÓN | 7 |
| CAPÍTULO 1 | El rompecabezas de la gravedad 13 |
| CAPÍTULO 2 | El agujero negro relativista 31 |
| CAPÍTULO 3 | La entropía, o la medida del desconocimiento 49 |
| CAPÍTULO 4 | El agujero negro cuántico 67 |
| CAPÍTULO 5 | El principio holográfico 97 |
| CAPÍTULO 6 | Desarrollos recientes 123 |
| LECTURAS RECOMENDADAS | 155 |
| ÍNDICE | 157 |

Los hologramas son objetos curiosos. Se trata de superficies de dos dimensiones pero, al mirarlás, vemos la imagen de un cuerpo tridimensional. Lo más interesante es que, si pudiésemos fijarnos solo en el grabado que da lugar a ese efecto, no veríamos algo parecido a la imagen que genera: la información necesaria para reconstruirla se halla distribuida por toda la superficie. El objeto tridimensional solo aparece al proyectar luz sobre el holograma.

Este fenómeno sugiere la posibilidad de que las dimensiones del espacio no sean tan importantes como creemos. Si toda la información necesaria para reconstruir un objeto tridimensional puede hallarse en tan solo dos dimensiones, quizá lo importante no sea la dimensionalidad, sino la información. ¿Podría ser que nuestro universo se comportase de forma similar? ¿Y si nuestra realidad tridimensional cotidiana no fuese más que un holograma?

Hoy tenemos razones para pensar que esa posibilidad descabellada describe el universo que habitamos. Se llegó a ellas, como muchas veces en ciencia, por el lado menos pensado. La teoría de la relatividad general de Einstein predecía la existencia de unos astros monstruosos, cuya gravedad era tan intensa que ni siquie-

ra la luz podía escapar de ellos una vez había caído en su interior: los agujeros negros. Pronto se descubrió que tenían propiedades que los distinguían de cualquier otro cuerpo en el universo. Los agujeros negros se parecían, en muchos aspectos, a una partícula elemental: como les sucede a estas, para describirlos bastaba con su masa, carga y momento angular. Tan extrema simplicidad exterior podría estar asociada a una simplicidad interna similar: quizá la materia que originó los agujeros solo podía, una vez en estos, acabar en alguno de los muy pocos estados microscópicos. En tal caso, la entropía de los agujeros negros, conforme se define la entropía en física estadística, sería muy baja, prácticamente nula. Pero eso vulneraría la segunda ley de la termodinámica, que afirma que la entropía siempre aumenta. Algo no cuadraría.

Los agujeros negros tienen especial importancia porque son de los pocos objetos donde tanto la mecánica cuántica como la relatividad general desempeñan un papel destacado. En la mayoría de las situaciones podemos ignorar una de las dos: por ejemplo, la fuerza gravitatoria entre dos electrones es nula a todos los efectos. Por otro lado, los efectos cuánticos no cuentan para las órbitas planetarias. Encontrar sistemas donde ambas teorías sean relevantes es de una gran urgencia, porque sabemos, desde hace décadas, que la mecánica cuántica y la relatividad general son incompatibles: no pueden ser ciertas a la vez porque describen realidades completamente distintas. Por poner un ejemplo: en la mecánica cuántica las fuerzas son el resultado, dicho sea de manera muy simplificada, del intercambio de partículas, mientras que en la relatividad general, en vez de hablarse de fuerzas gravitatorias, se describe la distorsión espacio-temporal causada por entes dotados de masa o por campos físicos.

La física de los agujeros negros experimentó grandes avances durante las últimas décadas del siglo pasado. En particular, la palma se la llevó Stephen Hawking (n. 1942). A partir de una hipótesis del físico Jacob Bekenstein (1947-2015), inspirada a su vez por un teorema del propio Hawking y según la cual los agujeros negros no solo tienen entropía, sino que es proporcional al área de la frontera que los envuelve, llegó a la conclusión de que los agujeros negros no son realmente negros: argumentó que, al

contrario de lo que se creía, tienen que emitir radiación al exterior, lo que, tarde o temprano, hace que desaparezcan.

Los hallazgos de Bekenstein y Hawking desencadenarían una serie de reflexiones que conducirían al *principio holográfico*, que afirma que, al contrario de lo que parece, la cantidad máxima de información necesaria para describir el contenido físico de una región tridimensional del universo no depende del volumen de la región, sino del área de la superficie bidimensional —espacial, no material— que la envuelve. (En versiones más depuradas de la idea, la región tridimensional no es exactamente el espacio envuelto por la superficie, sino que viene definida por rayos de luz que recorren ese espacio hacia o desde su centro; por otra parte, la idea puede generalizarse también a espacio-tiempos con más dimensiones, como los de la teoría de cuerdas.) La región puede ser incluso un universo entero, con unas nociones de «superficie» y «envolver» menos intuitivas entonces que en el caso de una región limitada.

El principio no prejuzga cómo sería una teoría del mundo a la que, en efecto, le bastase con la información de una superficie para describirlo. Una posibilidad es que se tratase de una teoría definida realmente en la superficie y no en el volumen, de modo que el universo «en volumen» que conocemos fuese solo una manifestación derivada del universo «superficial».

La clave está en que cabe interpretar la entropía, un concepto físico del que se suele decir que describe el desorden en un sistema, de un modo mucho más profundo: la entropía nos dice la cantidad de información microfísica que se encierra en un sistema físico. O en otras palabras: la entropía nos dice, básicamente, el número de bits necesario para dar el número de los estados microscópicos concretos compatibles con una descripción externa, macroscópica, más simple, del sistema físico de que se trate, pero que es todo lo que sabemos de él.

Se daba por sentado que la cantidad de información que puede almacenarse en una región del espacio tenía que ser proporcional a su volumen. Al fin y al cabo, la información está hecha de bits, incorporados en entes materiales: si queremos añadir más y el espacio que teníamos ya está lleno, añadiremos más es-

pacio. Y nuestro espacio es tridimensional. Dicho de otra forma: si queremos meter todos los libros que podamos en una caja, lo que nos importa es el volumen de la caja y no su superficie. Es algo tan lógico que parece absurdo ponerlo en cuestión.

Los agujeros negros, sin embargo, no se comportan así. De alguna forma, todo lo que ha caído en su interior se describiría, según el principio holográfico, con una cantidad de información proporcional al área de su superficie o, incluso, contenida en su superficie.

Uno podría pensar que los agujeros negros son un caso especial y que extrapolar lo que pasa en ellos al universo entero es llevar las cosas demasiado lejos. Por fortuna o por desgracia, esto no es así. La información está incorporada en la materia, que tiene masa. Y si queremos tener la máxima cantidad de información posible en una región del espacio, el límite vendrá dado por la masa que quepa en esa región. Pero a partir de una cierta densidad, la gravedad se vuelve tan potente que ni siquiera la luz puede escapar: se crea un agujero negro. Así pues, los agujeros negros serían los objetos con la densidad de información más alta del universo. Y la información que contendrían sería proporcional a su área.

Si uno acepta la idea de que nuestro universo es un holograma y toda la información necesaria para describirlo está en alguna superficie y no repartida por todo su volumen, se verá con más preguntas que respuestas. ¿Cómo, exactamente, se distribuye la información? ¿Cómo da lugar a la realidad con la que estamos familiarizados? ¿Cuál es el código que nos permite deducir la estructura del espacio a partir de la de su superficie?

Todas esas cuestiones siguen hoy abiertas, aunque en los últimos veinte años han ido apareciendo nuevas e importantes ideas. Muchos de esos desarrollos han tenido como protagonista la teoría de cuerdas, que es, de momento, la más firme candidata a unificar la relatividad general de Einstein y la mecánica cuántica, si bien el principio holográfico en sí es independiente de la teoría de cuerdas.

Un gran avance en la comprensión del principio holográfico fue el que logró el físico argentino Juan Maldacena (n. 1968), que construyó un modelo de universo, distinto del real, tal que toda su física podía ser descrita por la de un espacio-tiempo con

una dimensión espacial menos y que, en un determinado sentido, es su superficie. Maldacena usó para la física de la superficie una variante específica de la teoría cuántica de campos, la *teoría CFT*, que, pese a no describir el universo que habitamos, tiene muchas características en común con el modelo estándar (la teoría cuántica de campos es el conjunto de procedimientos con que se construye el llamado modelo estándar de la física de partículas, que describe las partículas elementales hasta ahora conocidas y sus interacciones, salvo la gravedad). El logro de Maldacena permitió establecer la primera correspondencia entre un universo con todas sus dimensiones, entre el *bulto*, pues, de ese universo, y una superficie que, en algún sentido, lo envuelve, demostrando que el principio holográfico no solo era admisible, sino que emergía de forma natural en un universo relativamente parecido al nuestro. Además, en el modelo de Maldacena las leyes de la física en la superficie, al contrario que en el bulto del universo, no contienen la gravedad: es decir, una teoría puramente cuántica daba lugar, a través de la holografía, a un universo con una dimensión más y con gravedad.

El descubrimiento de que un universo con gravedad podía generarse a partir de otro sin gravedad y con una dimensión menos generó una oleada de nuevas ideas. ¿Y si la gravedad no fuera fundamental, sino una consecuencia de la mecánica cuántica? Quizá, en lugar de unificar la mecánica cuántica con la relatividad general, lo que hacía falta era un nuevo enfoque donde la relatividad surgiera a partir de la mecánica cuántica y la holografía.

Uno de los primeros en proponer una idea radical al respecto fue el físico holandés Erik Verlinde (n. 1962), que asegura que la gravedad no es un fenómeno físico primario, sino el resultado de la segunda ley de la termodinámica unida a la idea de que la información del bulto se guarda en la superficie que lo acota. Partiendo del principio holográfico, Verlinde logró demostrar que, a partir de una serie de suposiciones razonables, se puede obtener el equivalente a la relatividad general de Einstein.

Por otro lado, Maldacena volvía a la carga, esta vez con su amigo Leonard Susskind (n. 1940), proponiendo algo aún más desca- bellado. Maldacena y Susskind ponían de relieve los paralelismos

entre dos estructuras en apariencia completamente distintas: las partículas entrelazadas y los agujeros de gusano. Un agujero de gusano es un conjunto de dos agujeros negros que se comunican entre sí, de forma que cualquier cambio en uno de ellos se refleja automáticamente en el otro. La gracia de los agujeros de gusano es que comunican dos regiones desconectadas del espacio, como el agujero que hace un gusano en una manzana. Por otro lado, las partículas elementales son capaces de hacer algo parecido gracias a la mecánica cuántica: es posible que dos partículas estén unidas formando un sistema físico de forma que, una vez separadas, una medida en la primera afecte instantáneamente a la segunda. A esto se le llama *entrelazamiento cuántico*. Lo más interesante de estos dos fenómenos es que son casi el portaestandarte de sus respectivas teorías: los agujeros de gusano son distorsiones del espacio-tiempo en sí, es decir, son parte de la geometría del universo; el entrelazamiento cuántico es un fenómeno que no puede darse en física clásica y que ofrece a la mecánica cuántica propiedades contrarias a la intuición. Maldacena y Susskind tomaron esos dos fenómenos y propusieron que eran uno mismo: dos partículas entrelazadas están unidas por un agujero de gusano o, alternativamente, dos agujeros negros unidos por un agujero de gusano están entrelazados. Esta hipotética equivalencia entre la geometría y el entrelazamiento nos da una pista de cómo puede surgir la gravedad a partir de la mecánica cuántica.

Hoy seguimos sin saber exactamente cómo se las arreglaría la teoría cuántica para generar un universo con gravedad y una dimensión más. Sin embargo, se vislumbra esta posibilidad: el espacio y la gravedad no son entes fundamentales, sino que surgen de las propiedades de la mecánica cuántica, con el entrelazamiento como principal sospechoso. Da la impresión que el principio holográfico nos ha llevado a un lugar más extraño de lo que nadie esperaba: nuestro espacio, más que de un holograma, parecería surgir de la nada.

El rompecabezas de la gravedad

La mecánica cuántica y la relatividad general de Einstein son las dos grandes teorías del siglo XX. A pesar de su gran éxito, presentan visiones diametralmente opuestas del universo. Hasta la fecha, todos los intentos para hacerlas compatibles han resultado infructuosos.

En la física es común encontrar dos teorías que hagan predicciones distintas sobre un mismo fenómeno. En estos casos, los experimentos suelen descartar a una de las candidatas y dar la razón a la otra. El caso de la relatividad y la mecánica cuántica es completamente distinto: más que hacer predicciones diferentes, las dos teorías parecen hablar idiomas que nada tienen que ver entre sí. Mientras que la relatividad habla del espacio y el tiempo y de cómo la presencia de una masa los modifica, la mecánica cuántica ve la naturaleza como si fuera una caja negra a la que podemos hacer ciertas preguntas, pero no otras. La relatividad habla de geometría; la mecánica cuántica, de intercambios de partículas. Por si fuera poco, las posibles contradicciones entre ambos modelos solo se dan a energías inalcanzables por los aceleradores de partículas actuales. Tenemos dos teorías contradictorias, ambas correctas en sus ámbitos de aplicación, y ninguna forma de saber cómo combinarlas.

Los últimos treinta años han visto una serie de avances en este frente. La mayoría de ellos no han venido de los experimentos, sino de un análisis cuidadoso de uno de los objetos más misteriosos predichos por la relatividad general: los *agujeros negros*.

El trabajo de Jacob Bekenstein y Stephen Hawking en los años setenta puso los cimientos para lo que acabaría convirtiéndose en el *principio holográfico*: la idea de que toda la información en una región del espacio está contenida en el área que la rodea.

CURVATURA O GRAVITONES

El universo que describe la relatividad general de Einstein es uno donde tiempo y espacio están íntimamente relacionados, tanto que se usa un solo vocablo para referirse a ellos: espacio-tiempo. El espacio-tiempo no es un ente estático, sino que puede doblarse como una red elástica e incluso transmitir energía en forma de ondas. Einstein descubrió que no había ninguna necesidad de describir la gravedad como una fuerza: según él, la atracción que sentimos hacia la Tierra es el efecto de la curvatura del espacio-tiempo, que transforma líneas rectas en curvas que desembocan en el centro de nuestro planeta.

Einstein partía de una idea en apariencia simple: una persona metida en una nave espacial sin ventanas no puede saber si se halla en un campo gravitatorio o si su nave está acelerando en el espacio. Es decir: un campo gravitatorio es indistinguible de una aceleración. En una de sus clásicas maniobras, en lugar de intentar explicar el fenómeno, Einstein lo elevó a principio, al que bautizó como *principio de equivalencia*. Este tiene varias formulaciones con el mismo significado. Una de ellas afirma:

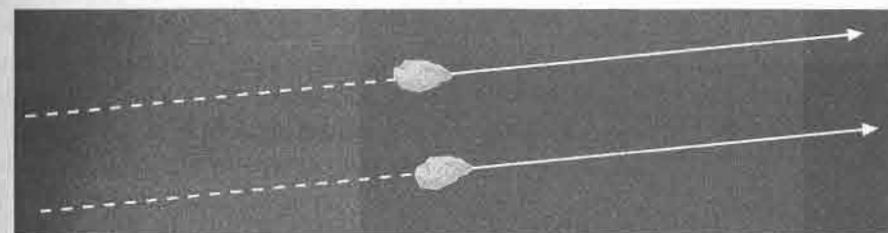
Los efectos gravitatorios son localmente indistinguibles de una aceleración.

La palabra clave es aquí *localmente*: asumimos que quien sufre los efectos del campo gravitatorio ocupa un espacio infinitamente pequeño. A un observador de tamaño apreciable le sería posible detectar variaciones en el campo gravitatorio, lo que no sucedería con una aceleración. Pongamos un ejemplo: la gravedad en la superficie de la Tierra es mucho mayor que, por ejemplo, a cinco mil kilómetros de altura. Si pudiésemos aumentar nuestro

tamaño hasta esas proporciones, notaríamos fuerzas distintas en nuestra cabeza y nuestros pies, lo que se traduciría en la sensación de que la gravedad intenta desgarrarnos. A esto se le suele llamar *fuerzas de marea* y es una prueba de que nos hallamos en un campo gravitatorio.

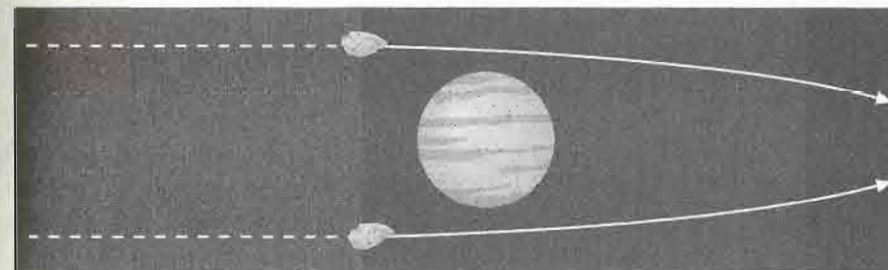
Las fuerzas de marea son el segundo ingrediente que Einstein necesitó para perfilar su nueva teoría de la gravedad. Imaginemos primero dos piedras flotando en un universo vacío, una al lado de la otra y moviéndose con una misma velocidad constante. Si sus velocidades son perfectamente paralelas, no se encontrarán nunca y la distancia entre ellas permanecerá constante, como se ve en la figura 1.

FIG. 1



Dos piedras moviéndose en línea recta en el espacio vacío, a solas, sin gravedad, sin ninguna interacción entre ellas o con nada más. Si se movían en paralelo al principio, seguirán haciéndolo después: la distancia entre ellas permanecerá constante.

FIG. 2



Dos objetos que se mueven en línea recta y en paralelo lejos de un campo gravitatorio curvan su trayectoria y pueden tender a converger cuando se internan en él.

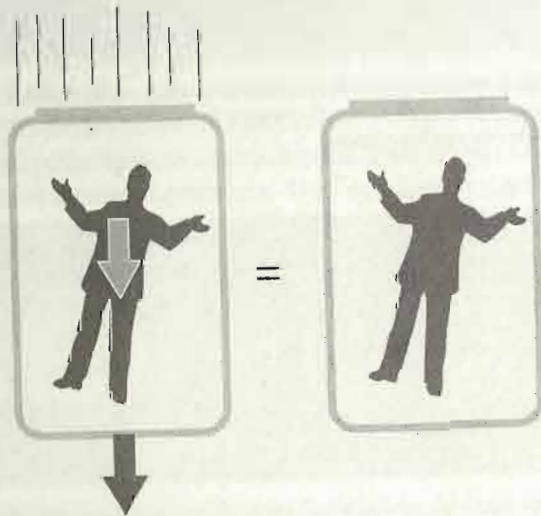
LAS DISTINTAS VERSIONES DEL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA

El principio de equivalencia de Einstein se puede formular de varias formas, todas ellas con el mismo significado. Cada una tiene un foco distinto y ayuda a clarificar lo que quiere decir Einstein cuando afirma que los efectos gravitatorios e inerciales son indistinguibles.

El observador acelerado

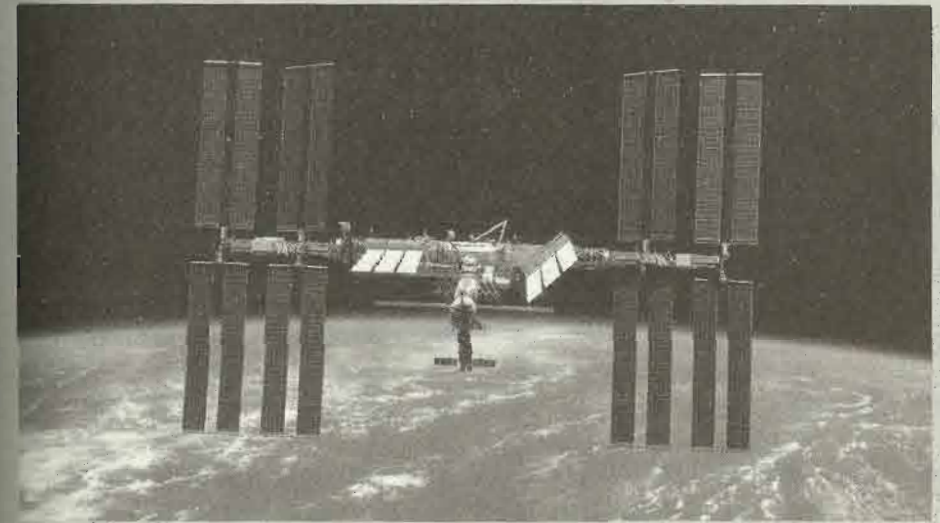
La primera forma se centra en sistemas que sienten una aceleración y afirma: «Un campo gravitatorio es localmente indistinguible de una aceleración». Es decir, un observador que no pueda ver su entorno no podrá saber si está siendo acelerado —por ejemplo por un cohete—, en el espacio vacío y lejos de cualquier masa que pueda atraerlo, o si se halla dentro de un campo gravitatorio —es decir, en la proximidad de masas que ejercen su atracción gravitatoria sobre él— en el que no se está dejando caer. Si la aceleración es de unos $9,8 \text{ m/s}^2$, por ejemplo, no sabrá si está en el cohete o tranquilamente sobre la superficie de la Tierra (siempre que se puedan obviar los efectos de la rotación de esta), con los pies bien apoyados en el suelo y no tirándose por una ventana o cayéndose por un precipicio. Piénsese en que para no dejarse caer en un campo gravitatorio hay que tener un cohete o algún otro sistema que contrarreste la atracción gravitatoria, o se ha de estar sobre la superficie de la masa gravitatoria que ejerce esta atracción, cuya cohesión material es la fuerza que la impide desplomarse sobre sí misma, una fuerza contra su propia gravedad. Es nuestro caso habitual, pero la Tierra misma, por otra parte, está en caída libre alrededor del Sol, y nosotros con ella.

Un observador en caída libre (izquierda) se mueve con la misma aceleración y velocidad que el ascensor en el que se encuentra y al que se le han cortado los cables, así que no apreciaría ninguna diferencia con lo que experimentaría si se encontrase en la misma cabina cerrada de ascensor pero flotando en el vacío, lejos de cualquier masa que pudiera atraerla (derecha).



El observador en caída libre

El problema puede verse también desde el punto de vista de quien *sí* se deja caer en el campo gravitatorio. En este caso, el principio de equivalencia se expresa así: «Un observador en caída libre en un campo gravitatorio experimentará los mismos efectos que otro moviéndose en línea recta y a velocidad constante lejos de cualquier masa». Es decir, un observador que no pueda ver su entorno no sabrá si se encuentra en reposo o con movimiento inercial en el espacio vacío y lejos de cualquier masa, o si se halla dentro de un campo gravitatorio en el que se está dejando caer. Esta formulación nos dice que un observador que esté dentro de un ascensor en caída libre experimentará una sensación de ingravidez a pesar de hallarse en un campo gravitatorio (véase la figura). Eso explica por qué los astronautas de la estación espacial internacional flotan: el campo gravitatorio terrestre no es cero donde se hallan, pero tanto ellos como la estación están en caída libre; los cohetes están apagados y la estación y la tripulación sufren la misma aceleración hacia el centro de la Tierra (y por lo tanto están en reposo mutuo). Ahí está implícita otra formulación del principio de equivalencia: la aceleración gravitatoria es la misma para cualquier masa, sea grande o pequeña, esté hecha de lo que esté hecha. Téngase en cuenta que «en caída libre» no significa necesariamente precipitarse de cabeza contra la masa atractiva: si se cuenta con la velocidad suficiente, se combinará con la aceleración hacia el centro de la Tierra, de modo que se describirán órbitas alrededor de esta o trayectorias abiertas que vendrán de lejos, se curvarán y se alejarán de nuevo hacia el infinito.



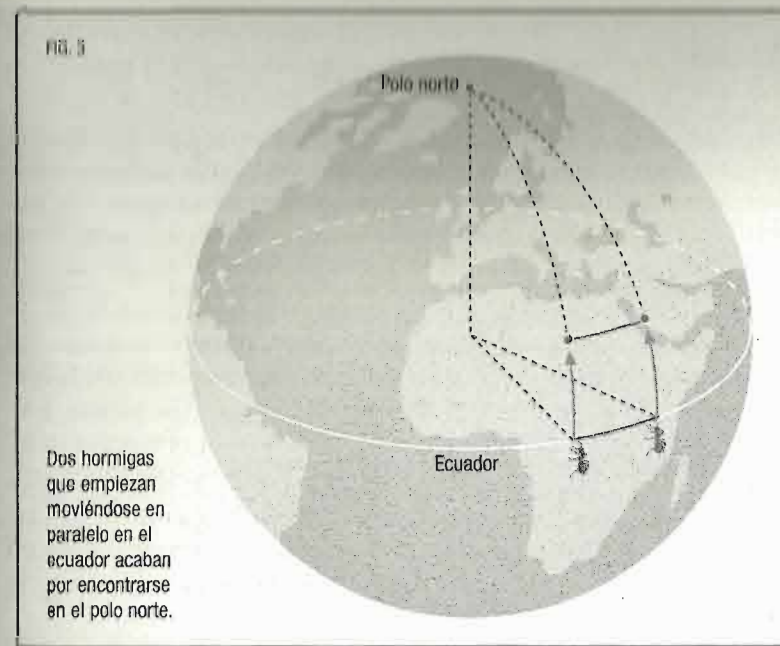
Vista de la Estación Espacial Internacional. Ella y sus ocupantes están en caída libre alrededor de la Tierra; por eso los astronautas flotan en ella.

Veamos qué sucede cuando esas dos piedras se encuentran en su camino un campo gravitatorio generado por una gran masa esférica. A medida que se vayan internando en él y se les vaya haciendo más intenso, sus trayectorias se irán curvando hacia el «planeta». Una posible trayectoria podría ser la de la figura 2.

A pesar de que ambas piedras empiezan moviéndose en paralelo, la distancia entre ellas se reduce paulatinamente. Una persona cualquiera pensaría que se trata de una simple coincidencia, pero Einstein no era una persona cualquiera: para él, el hecho de que dos paralelas acabasen cortándose era una señal inequívoca de que la geometría del universo no podía ser la que se enseña en las escuelas. Einstein dedujo que un campo gravitatorio modifica la geometría del universo, en el que produce una cierta *curvatura*. Para entender lo que esto significa, basta pensar en lo que observaría una hormiga en la superficie de una esfera. En este caso, dos hormigas que empiezan moviéndose en paralelo en el ecuador acaban por encontrarse en el polo norte, como se aprecia en la figura 3.

Si las dos hormigas no tienen acceso a la tercera dimensión y están confinadas en la superficie de su esfera, nunca podrán ver que su espacio es curvo. Sin embargo, podrán deducirlo al observar que dos trayectorias inicialmente paralelas acaban por encontrarse. Según Einstein, las personas nos encontramos en una situación similar: estamos ancladas a un universo de tres dimensiones, cuatro si contamos el tiempo, y no podemos ver la curvatura directamente. Sin embargo, sí podemos deducir su presencia a partir del hecho de que las trayectorias paralelas acaban por encontrarse o separarse más en presencia de un campo gravitatorio. A partir de ahí Einstein estableció que la materia deforma el espacio-tiempo y fuerza a la luz y a los cuerpos, siempre que no estén sometidos a fuerzas que no sean gravitatorias, a moverse por las trayectorias que en el espacio-tiempo hacen las veces de las rectas y que reciben el nombre de *geodésicas*. Es decir, no existe la fuerza de la gravedad: todo lo que hay es una deformación del espacio y del tiempo.

La mecánica cuántica describe un universo completamente distinto. Coincide con la relatividad general de Einstein en



que las fuerzas no son sino el reflejo de la actuación de agentes físicos de otra índole, pero ahí acaba todo parecido. La teoría cuántica de campos afirma que las fuerzas entre partículas son el resultado de la intervención de otras partículas, asociadas por la teoría a lo que en la física clásica son campos de fuerza (como el electromagnetismo). Un ejemplo muy elemental de que el intercambio de un ente físico altera el movimiento de quienes se lo intercambian: dos jóvenes se pasan una pelota, con la particularidad de que se encuentran en una pista de hielo, así que cuando el primer joven lanza la bola, sale disparado hacia atrás, y lo mismo le pasa al segundo cuando la recibe.

Sin embargo, no se debe pensar que la interacción electromagnética entre dos electrones, por ejemplo, se debe a un intercambio de fotones (la partícula asociada a esa forma de fuerza) tan simple como el de la pelota entre los dos jóvenes. En las ecuaciones de la teoría se superponen una infinidad de intercambios con distintas configuraciones, y ni siquiera los fotones

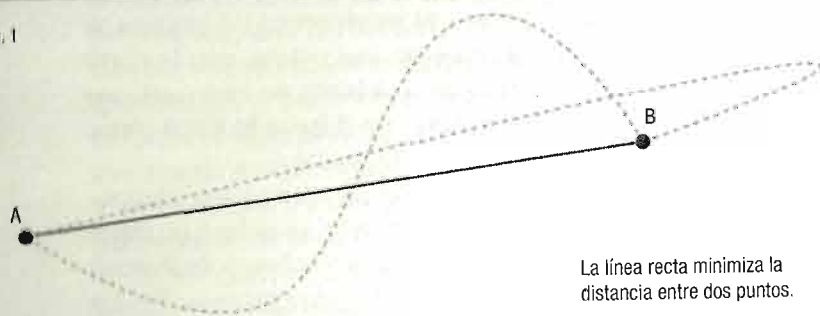
LÍNEAS RECTAS Y GEODÉSICAS

La línea recta se suele definir como la distancia más corta entre dos puntos. Encontrar la trayectoria que cumple ese requisito es un problema que puede resolverse de forma relativamente sencilla en una geometría plana, sin curvatura. La forma de hacerlo es considerar dos puntos cualesquiera y buscar el trayecto que minimice la distancia entre ellos, como se muestra en la figura 1. En el caso de espacios curvos, la geodésica se define exactamente de la misma forma. Pongamos, por ejemplo, la superficie de la Tierra. Queremos encontrar la distancia más corta entre dos puntos cualesquiera, con la restricción de que nos tenemos que mover por la superficie. Intuitivamente se tiende a pensar que la distancia más corta sobre la esfera es la línea que más nos recuerda a una recta: un arco de paralelo, si es que los dos puntos tienen la misma latitud. Sin embargo, no es así: la distancia más corta, la geodésica, entre dos puntos de la esfera es, como se ve en la figura 2, siempre un arco de círculo máximo, que será, por lo tanto, la «recta» de la esfera, aunque proyectada en un mapa parecerá de ordinario una curva. La forma de la geodésica dependerá de la curvatura del espacio donde nos hallemos (la «forma» de una geodésica se refiere a la que tiene cuando la superficie curva a la que pertenece es vista desde un espacio de una dimensión mayor y sin curvatura en el que está inmersa, como cuando miramos un globo terráqueo). En un espacio hiperbólico, parecido a una silla de montar, tendremos geodésicas distintas. En general, en un espacio curvo puede haber más de una geodésica entre dos puntos.

En el espacio-tiempo

Según la relatividad general, toda partícula que no se halle sujeta a alguna fuerza se moverá por una geodésica de un espacio-tiempo curvo: la gravedad ya no cuenta como una fuerza, ya que sus efectos vienen dados por ese movimiento geodésico en un mundo curvado; la acción de un cohete sobre una nave, por ejemplo, sí. Así, los planetas siguen trayectorias geodésicas. Para entender esto, téngase en cuenta que en la relatividad general la distancia a la que la geodésica da un valor extremo con respecto a cualquier otra trayectoria no es una distancia meramente espacial, sino espacio-temporal (por el tratamiento diferente del tiempo y del espacio en las ecuaciones, la geodésica ya no es «el camino más corto»). Es decir, una geodésica

FIG. 1



en el espacio-tiempo no solo nos dice qué posiciones ocupará un cuerpo, sino también en qué instante (figura 3). Esa es la razón por la que las geodésicas espacio-temporales determinan las órbitas planetarias, dándonos tanto la posición del planeta como su velocidad.

FIG. 2

La geodésica (la línea discontinua) une dos puntos mediante el camino más corto (aquí, entre Múnich y Seattle). Téngase en cuenta que los paralelos del globo terráqueo, como la línea continua, no son una geodésica entre puntos de igual latitud, como más o menos es el caso de Múnich y Seattle. En la esfera las geodésicas son arcos de círculo máximo (por ejemplo, un meridiano).

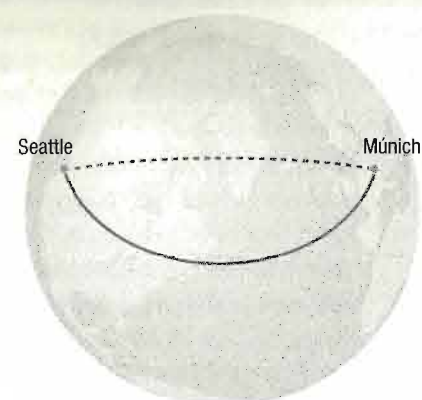
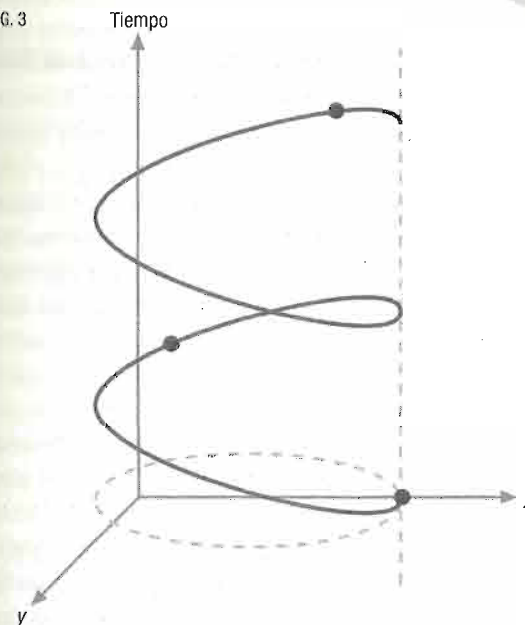


FIG. 3



Las geodésicas espacio-temporales no solo determinan la posición de una partícula, sino el instante en el que la ocupará. En la figura puede verse un ejemplo de órbita en un espacio bidimensional, donde el tiempo transcurre en la dirección ascendente.

que intervienen en el proceso son como los fotones que un láser o una estrella disparan, que tienen una existencia indefinida y pueden atravesar el universo: su existencia es efímera, y lo es

Necesitamos una combinación de la relatividad general, que describe la distorsión del espacio y el tiempo, y la física cuántica, que describe las incertidumbres en esa distorsión y su evolución.

KIP THORNE

por principio (jamás podrá uno de ellos escapar hacia el amplio mundo), y por eso reciben el apelativo de «virtuales». La naturaleza del proceso vuelve en realidad problemático el concepto mismo de partícula, al menos tal y como se usa en este contexto.

En cualquier caso, todo lo anterior es ajeno a la relatividad general.

Durante los años sesenta muchos físicos destacados intentaron, sin embargo, deducir una versión cuántica de la relatividad de Einstein. De la misma forma que la interacción electromagnética es transmitida por fotones, la fuerza gravitatoria tendría que tener su propia partícula mensajera, a la que bautizaron como *gravitón*. Al contrario que en el caso del electromagnetismo, los gravitones dan lugar a una fuerza que es siempre atractiva; además, afectan a todas las partículas, mientras que solo las que poseen carga son sensibles al campo electromagnético.

Sin embargo, cuantizar la gravedad resultó una tarea mucho más ardua de lo esperado. La costumbre de los gravitones de pegarse a cualquier cosa, incluidos otros gravitones, creaba una infinidad de problemas matemáticos, nunca mejor dicho: en gravedad cuántica, cualquier cálculo daba como resultado un infinito.

Es habitual que aparezcan infinitos en la mecánica cuántica de campos. Todas las teorías de campos conocidas dan lugar a infinitos en los cálculos. Las razones por las que eso sucede son algo técnicas, pero la raíz del problema se encuentra en el hecho de que el espacio se considera como infinitamente divisible y las partículas elementales son puntos sin extensión. Pongamos, por ejemplo, un electrón: posee una cierta carga, pero la carga se repele a sí misma con una intensidad que aumenta al reducir la distancia. A una distancia nula, esa fuerza se vuelve infinita. Dado que el electrón es un punto, la energía que se requeriría

para crearlo juntando imaginariamente carga desde otras partes del espacio tendría que ser infinita.

Estos infinitos no suelen ser un problema gracias a una técnica matemática llamada *renormalización*, que consiste en ignorar los detalles por debajo de una cierta resolución de forma tal que los infinitos desaparezcan. Sin embargo, esto no funciona con la gravedad: los infinitos permanecen, hagamos lo que hagamos. Se suele decir que la gravedad cuántica es una teoría *no renormalizable*. El problema está en la naturaleza universal de la gravedad: un gravitón interactúa con otros, de forma que el efecto se multiplica hasta dar lugar a resultados absurdos. Hasta la fecha, nadie ha encontrado la forma de solucionar el problema, aunque se han hecho algunos progresos, en particular en la *teoría de cuerdas*, que en lugar de tomar como premisa que las partículas son puntuales presupone que son pequeñas cuerdas con una cierta extensión.

CERTEZA CONTRA INDETERMINACIÓN

La relatividad general es una teoría *clásica*. Los físicos llaman «clásica» a toda teoría que no sea cuántica: la gravedad de Newton, por ejemplo, es otra teoría clásica. Las teorías clásicas se distinguen por ser *deterministas*: si uno conoce el estado del universo en un cierto momento, lo conoce también en todo instante pasado y futuro. Por el contrario, la mecánica cuántica introduce un elemento aleatorio: aunque algunas de las magnitudes de un sistema cuántico tengan un valor determinado, siempre habrá otras para las que no podremos saber de antemano el resultado que se obtendrá al medirlas. Todo lo que la teoría nos dice es la probabilidad de obtener uno u otro. Pero la evolución de esas probabilidades desde el pasado al futuro sí es determinista.

Esa característica fundamental de la física cuántica está íntimamente relacionada con el *principio de indeterminación de Heisenberg*. En las teorías clásicas, uno puede medir cualquier cantidad con precisión infinita. No es posible en la práctica, pero

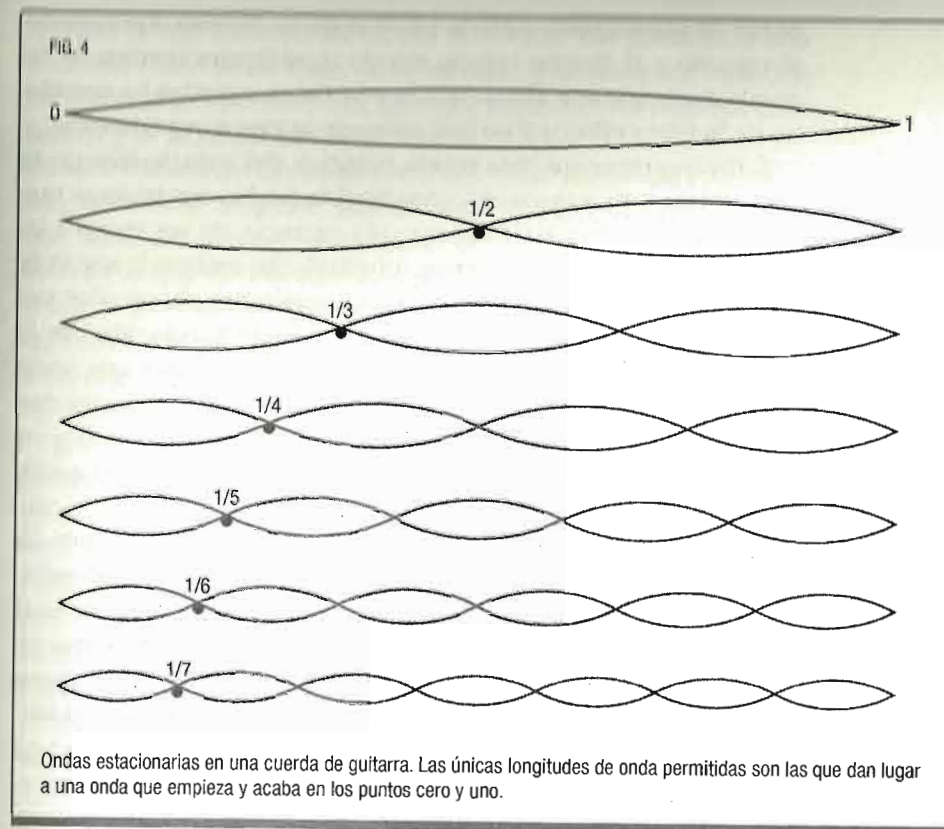
no hay ninguna razón teórica que lo impida. Podemos pensar en una medida como si fuera una pregunta que le hacemos a la naturaleza y cuya respuesta es un número: en este sentido, nuestras preguntas no están limitadas. El caso de la mecánica cuántica es distinto: la precisión de nuestras medidas está restringida, pero no debido a limitaciones experimentales, sino teóricas: hay ciertas cantidades, como el momento (el producto de la masa por la velocidad) y la posición, que no podemos conocer a la vez con absoluta precisión, y eso es lo que dice el principio de indeterminación. La naturaleza solo nos deja hacer ciertas preguntas.

ESPACIO CONTINUO CONTRA GRANULADO

En la mecánica cuántica el comportamiento de la materia viene dado por algo llamado la *función de onda*, que contiene toda la información sobre el estado de las partículas en cada momento. La función de onda no vive en un espacio normal, sino en uno abstracto de infinitas dimensiones llamado *espacio de Hilbert*. La podemos imaginar como una lista de todos los resultados posibles de realizar una medida en la partícula, con la probabilidad de cada uno.

El nombre «función de onda» no es gratuito: la función de onda generaliza la idea de De Broglie de que una partícula libre puede describirse también como una onda de una determinada frecuencia. Esta dualidad se confirma en experimentos en los que una sola partícula se manifiesta meramente como tal, como un punto en una pantalla, digamos, pero en los que la repetición con más partículas acaba produciendo un patrón de interferencia típicamente ondulatorio.

También es un fenómeno ondulatorio típico el de las ondas estacionarias, ondas que se hallan confinadas en una región del espacio. Un ejemplo perfecto es la onda que se transmite por la cuerda de una guitarra. Dado que los dos extremos de la cuerda están fijos, solo algunas longitudes de onda son posibles, como se observa en la figura 4. A cada longitud de onda le corresponde una energía: así pues, esperamos encontrar solo un reducido



conjunto de energías posibles. Decimos que las energías están «cuantizadas».

Con la función de onda del electrón del átomo de hidrógeno consiguió Schrödinger deducir de forma natural la cuantización —hasta cierto punto análoga al caso de la cuerda de guitarra— de los niveles de energía del átomo, con la que se explicaba los espectros de emisión del hidrógeno. Sustituir magnitudes que en la física clásica toman cualquier valor del continuo de los números reales con magnitudes que solo pueden tomar valores discretos es un resultado característico de la mecánica cuántica. Como ya hemos visto, en la teoría cuántica de campos hasta los campos de fuerza continuos de la física clásica se construyen a

partir de superposiciones de estados de partículas. En cambio, el espacio y el tiempo siguen siendo magnitudes continuas. Se puede decir que son elementos que la física cuántica ha heredado de la física clásica y no han sido sometidos a cuantización.

Cabe imaginar que una teoría cuántica del espacio-tiempo lo describiese con una cierta «granularidad». No tendríamos que poder dividirlo indefinidamente; al contrario, en un cierto momento llegaríamos a la mínima longitud. Sin embargo, según la relatividad eso no es posible. En esta, cualquier observador tiene que estar de acuerdo en una medida: la de la velocidad de la luz. Esta restricción aparentemente inofensiva tiene una serie de consecuencias, una de las cuales es que la distancia entre dos puntos depende del observador que la mida; lo mismo pasa para intervalos temporales, que tienen distinta duración según quién los observe.

Dado que, en relatividad, la longitud depende de quién la mida, la idea de un espacio granulado con una longitud mínima se vuelve imposible: esa longitud mínima sería distinta para cada observador, y para algunos se parecería cuanto se quiera a cero. Nos vemos obligados a escoger entre dos males: o bien la mecánica cuántica se equivoca y el espacio no es granulado, o bien la relatividad falla a distancias cortas y la velocidad de la luz no es constante. Ninguna de las opciones es deseable y, de hecho, la mayoría de los físicos están convencidos de que tiene que ser posible encontrar una solución que evite el conflicto. Sin embargo, la gravedad cuántica de bucles, una de las candidatas a teoría de la gravedad cuántica, apuesta por una modificación de la relatividad de Einstein a distancias cortas. Pero, de momento, no se ha observado ninguna desviación de las predicciones de Einstein.

FALTA DE DATOS

Unificar la relatividad general y la mecánica cuántica está resultando un proceso mucho más arduo de lo que cabía imaginar. En la actualidad, aún no poseemos ninguna teoría que lo logre,

aunque se han dado pasos en esa dirección. Los problemas son muchos, como se ha visto. La relatividad y la mecánica cuántica no son solo teorías distintas, sino que pertenecen a mundos diferentes y ni siquiera hablan el mismo idioma. Combinarlas requiere encontrar un nuevo lenguaje matemático que describa ambas realidades. Si bien la teoría de cuerdas ha hecho progresos en ese sentido, sigue siendo cierto que aún no existe una versión definitiva que hable claramente de nuestro mundo.

Por si eso fuera poco, los físicos se ven con otro obstáculo: la falta de datos experimentales. La gravedad es una fuerza muy débil, tanto que sus efectos a escala microscópica son insignificantes y, por el momento, imposibles de medir. Los efectos de la relatividad solo se manifiestan en campos gravitatorios fuertes, pero para crearlos se necesita una gran cantidad de materia, por lo que los efectos cuánticos dejan de ser relevantes. Se suele decir que si quisiéramos construir un acelerador de partículas capaz de analizar efectos gravitatorios, sus brazos tendrían que dar la vuelta a la galaxia.

A falta de datos, los físicos han decidido usar un laboratorio virtual: los agujeros negros. Un agujero negro típico es una estrella cuya propia atracción gravitatoria forzó a una parte de su masa a contraerse hasta el infinito, creando de paso un *horizonte de sucesos*, una frontera a partir de la cual ni siquiera la luz puede escapar, aunque a través de ella puede que haya ido cayendo más materia (sin embargo, al menos en teoría, no es necesario que un agujero negro se origine en una estrella).

Los agujeros negros son un escenario ideal, por varias razones: por un lado, son los objetos más simples del universo, lo que, en cierto sentido, los hace fáciles de estudiar matemáticamente; por otro, dan lugar a campos gravitatorios fuertes y, debido a que toda su materia ha acabado en un punto, los efectos cuánticos tendrían que ser apreciables. Centrándose en los agujeros negros y tomando como premisa que los resultados que dé

En vez de un retículo tridimensional, una descripción completa de la naturaleza requiere solo un retículo bidimensional en las fronteras espaciales del mundo.

LEONARD SUSSKIND

nuestra teoría unificada tienen que ser congruentes con lo que sabemos de relatividad y mecánica cuántica, ha de ser posible llegar a ciertas conclusiones sobre la forma de esa teoría final.

El estudio de los agujeros negros ha generado innumerables sorpresas y continúa hoy produciendo frutos. De momento, ha obligado a los físicos a replantearse el papel de la información en el cosmos e incluso a cuestionar los conceptos mismos de espacio y tiempo, dando lugar a lo que hoy se conoce como *principio holográfico*.

El agujero negro relativista

La relatividad predice la existencia de lugares de donde no podría escapar ni la luz: los agujeros negros. Se trata de los cuerpos celestes más simples que existen, con propiedades que los asemejan a partículas elementales. Su estudio es fundamental en nuestra comprensión de la gravedad cuántica.

Meses después de que Einstein completase su teoría de la relatividad general, el físico Karl Schwarzschild (1873-1916) le escribió desde el frente de la Primera Guerra Mundial con una solución sorprendentemente elegante a sus ecuaciones. Al cabo de poco, Schwarzschild moriría tras contraer una rara enfermedad.

La solución de Schwarzschild describía la distorsión del espacio-tiempo creada por un objeto aislado en el espacio vacío como si su masa estuviese concentrada en su centro. Podía usarse, por ejemplo, para calcular las órbitas planetarias alrededor del Sol. Como todo modelo matemático, se trataba de una simplificación: en realidad, la masa de una estrella está distribuida sobre un cierto volumen. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones que nos interesan esto carece de importancia: a todos los efectos, podemos suponer que el Sol se comporta como si fuera una partícula puntual. Las ecuaciones de Schwarzschild no funcionan en el interior del astro, pero sí en su exterior.

Su solución contenía una distancia al centro de la estrella, proporcional al doble de su masa, que parecía anómala: en ella el tiempo parecía detenerse. Dado que esa frontera se encontraba dentro del astro y, en principio, fuera del ámbito de validez de

las ecuaciones, nadie le dio mucha importancia. En cambio, hoy sabemos que esa distancia crítica puede encontrarse en el vacío, donde la solución es válida; ciertas estrellas pueden desplomarse sobre sí mismas de forma que parte de su materia atraviere esa frontera mientras que el resto es despedido hacia el exterior. Es la señal inequívoca de que se ha creado un *agujero negro*. A la distancia crítica se la suele llamar *radio de Schwarzschild*, y a la superficie esférica que define, *horizonte de sucesos*.

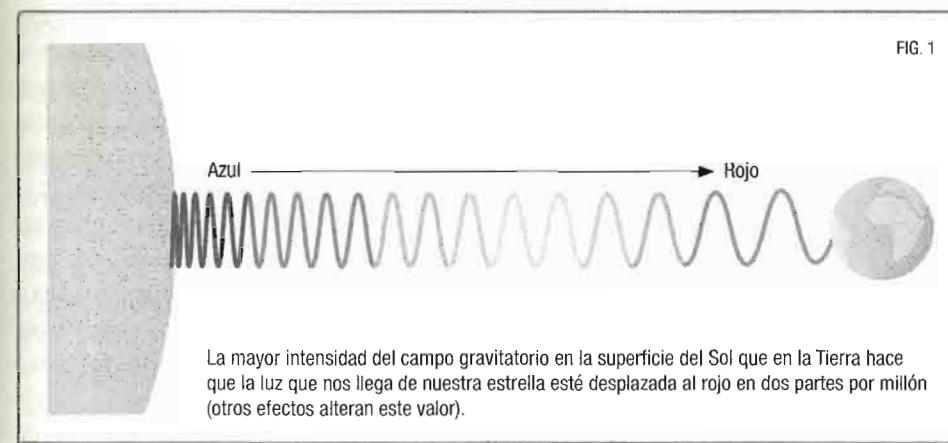
ESTRELLAS CONGELADAS

Imaginemos un astronauta que se halla en una órbita muy elevada con respecto a otro, más cercano al astro que crea el campo gravitatorio donde se encuentran ambos y que será, por lo tanto, menos intenso para el astronauta de la órbita elevada. Supongamos también que sus naves tienen los cohetes encendidos de forma que no roten alrededor del centro del astro ni se precipiten libremente hacia él, con el resultado de que no haya ningún movimiento relativo entre ellas. Entonces, si el astronauta más cercano al astro envía una señal lumínica al otro, la relatividad general predice que este la percibirá más roja que aquel. Dicho de otra forma: los relojes del astronauta más cercano al planeta y del astronauta más alejado no se comportarán igual, en el sentido de que comparados ambos con una misma radiación le medirán una frecuencia distinta (y, por lo tanto, los astronautas la verán con un color distinto). El astronauta en una órbita alejada mide una frecuencia menor, lo que significa que pasa más tiempo entre dos picos de la onda de luz según sus relojes. No es un problema de la luz, de que se «canse» al remontar el campo gravitatorio. Si el observador cercano al astro emite dos fotones, o dos partículas materiales, separados por un determinado lapso de tiempo según sus relojes, el astronauta más alejado observará según los suyos que le llegan separados por un lapso mayor. Y no depende del tipo de reloj: el propio cuerpo humano valdría como tal; reunidos los astronautas, se vería que el cercano al astro habría envejecido menos. Claro está, para que el efecto fuese perceptible tendría

que haberse sumergido en un campo muy intenso. Pero con mediciones precisas de laboratorio, es medible incluso sin salir del campo gravitatorio de la Tierra. La gravedad no solo distorsiona el espacio, sino que dilata el tiempo. A este comportamiento se le llama *dilatación temporal gravitatoria* (figura 1).

Hasta hay situaciones cotidianas donde el efecto debe ser tenido en cuenta, aunque mezclado con otros efectos que alteran también el comportamiento comparativo de los relojes, efectos relacionados, por medio de la teoría de la *relatividad especial*, con las velocidades relativas del emisor y del receptor. Así, por ejemplo, los relojes instalados a bordo de los satélites GPS van más deprisa que los de tierra porque el campo gravitatorio de la Tierra es más débil en su órbita que en la superficie. Este efecto se ve parcialmente compensado por otro, debido a la relatividad especial, que causa un retraso en los relojes; en el caso de la Estación Espacial Internacional, en órbita más baja, su gran velocidad compensa con creces los efectos gravitatorios, de forma que el tiempo pasa más lento que en la superficie del planeta. Es un efecto pequeño, pero no despreciable: hay que tenerlo en cuenta para que el GPS funcione bien.

La energía de un rayo de luz viene dada por su frecuencia: a más frecuencia, más energía. El porqué puede comprenderse fácilmente si pensamos en alguien que nos está dando golpes en la



cabeza cada cierto tiempo: cuanto más frecuentemente nos golpeen, más nos dolerá. Que la frecuencia sea menor significa —es equivalente— que su longitud de onda será mayor. En física se suele decir que la longitud de onda entonces se ha *desplazado al rojo*.

Lo que sucede en el horizonte de sucesos es un caso extremo de dilatación temporal. Supongamos por un momento que la solución de Schwarzschild representa un astro real que colapsó de forma que la contracción no se detuvo antes de que su radio fuera menor que el del horizonte de sucesos correspondiente a su masa, con lo que se formó un agujero negro. ¿Qué vería alguien que cayese hacia el horizonte de sucesos?

Recordemos a los dos astronautas del principio de este apartado, y supongamos, pues, que su astro es un agujero negro. Ambos se comunican a base de señales de luz. Si el astronauta que está más cerca del horizonte de sucesos se acerca más a este, y luego más y más, la gravedad se volverá más y más potente, de forma que la luz que emita se desplazará para el astronauta lejano cada vez más al rojo y verá que las acciones de su compañero suceden cada vez más lentamente.

Muy cerca del horizonte de sucesos, la luz estará extremadamente desplazada al rojo: si entre dos impulsos luminosos pasa un milisegundo para el astronauta que cae, el de la nave los verá separados por años. En el horizonte de sucesos, los impulsos se espaciarán infinitamente: al astronauta en la nave le parecerá que el tiempo se ha congelado para su colega.

Cuando se crea un horizonte de sucesos, se llama *agujero negro* a la zona que define. Otro nombre que se les ha dado en el pasado es el de *estrellas congeladas*, porque el tiempo no parece pasar a partir de cierto punto. Como se explicará más adelante, esto solo es cierto para alguien que se encuentra fuera del horizonte de sucesos: un observador que cae a través contará una historia muy distinta. La dualidad entre lo que ve alguien desde fuera y lo que aprecia alguien en el interior es otra pieza clave del principio holográfico: resulta que ambos observan aspectos complementarios y aparentemente contradictorios de la realidad. Reconciliar ambas visiones llevó a proponer una solución

de la paradoja de los agujeros negros: que la información está presente de formas distintas, aparentemente incompatibles, dependiendo de quién observe.

LA FORMACIÓN DE UN AGUJERO NEGRO

La existencia de los agujeros negros fue puesta en cuestión durante décadas. La mayoría de los físicos, incluido Einstein, creía que era imposible llegar a las densidades necesarias para que masas del orden de magnitud de la de una estrella cupieran dentro de su horizonte de sucesos: una estrella corriente es muchísimo mayor que un agujero negro con su misma masa. Por ejemplo, en el caso del Sol el horizonte de sucesos tendría un radio de kilómetros; el de la Tierra, de milímetros. Las ecuaciones de Schwarzschild funcionan bien para el exterior de nuestra estrella, pero fallan estrepitosamente en su interior.

En general, una estrella evita el colapso gracias a la presión que producen las reacciones nucleares en su interior. Cuando el astro agota su combustible, las reacciones nucleares se detienen y la gravedad gana la partida y empieza a contraer la estrella. No obstante, hay un límite: llega un momento en el que los electrones están tan juntos que no es posible apretarlos más. A esto se le llama *presión de degeneración electrónica* y, para una mayoría de las estrellas, es suficiente para parar los pies a la gravedad y evitar la creación de un agujero negro. Sin embargo, como demostró en 1930 Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995), con solo 19 años, a partir de una cierta masa ni siquiera la presión de degeneración electrónica es suficiente para detener el colapso.

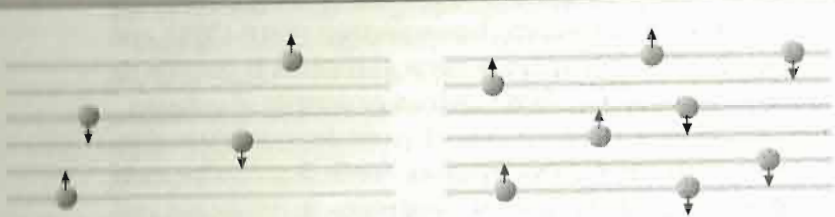
Cuando la gravedad vence a la presión de degeneración electrónica, la estrella sigue contrayéndose hasta densidades cada vez mayores. En ese momento, los electrones se combinan con protones y dan lugar a neutrones. Se ha creado una *estrella de neutrones*, cuya densidad es igual a la de un núcleo atómico. Los neutrones son aplastados cada vez más por la gravedad, hasta que están demasiado juntos y se rebelan mediante su propia presión de degeneración, que logra estabilizar a la estrella

ENANAS BLANCAS Y EL PRINCIPIO DE EXCLUSIÓN DE PAULI

La presión de degeneración electrónica que evita el colapso gravitatorio de una enana blanca se debe a algo llamado *principio de exclusión de Pauli*. Se refiere a una propiedad de las partículas elementales llamada *espín*. Decimos que una partícula elemental tiene *espín* cuando gira sobre sí misma. Para ser más precisos, el *espín* corresponde a su *momento angular intrínseco*; es decir, a una magnitud física que formalmente es como un momento angular, pero no está ligada a una verdadera rotación espacial de la partícula (un punto no puede en realidad girar sobre sí mismo).

No en el mismo estado cuántico

Las partículas elementales son de dos tipos: por un lado, algunas de ellas tienen un *espín* que es múltiplo de un valor conocido como constante de Planck reducida. A estas partículas las llamamos *bosones*. Por otro, pueden tener un *espín* igual a un múltiplo semientero de esa constante; en este caso, las llamamos *fermiones*. Los fermiones de *espín* 1/2 pueden tener *espín arriba o abajo* en cualquier dirección espacial (es decir, el *espín* tomará solo uno de dos valores posibles, a los que se denomina simbólicamente de esa manera, en cualquier medición de esa magnitud). Los fermiones tienen una propiedad curiosa: dos de ellos no pueden hallarse en el mismo estado cuántico. Esto es lo que se conoce como *principio de exclusión de Pauli*. Es lo que hace que, por ejemplo, los átomos den lugar a una química compleja: los fermiones tienden a ocupar solo órbitas vacías, donde no se halla ya otro electrón con su mismo *espín*. Lo mismo sucede en una enana blanca: al comprimirse, los electrones se ven empujados cada vez más cerca, hasta que llega un momento en el que tendrían que ocupar el mismo estado. Pero el principio de exclusión de Pauli lo impide: dos electrones no pueden hallarse en el mismo estado. Eso crea una presión repulsiva tan enorme, la *presión de degeneración electrónica*, que, en algunos casos, es capaz de compensar la atracción gravitatoria; solo si la masa que se comprime es mayor que 1,4 masas solares, cota que recibe el nombre de límite de Chandrasekhar, no lo logrará. La gran mayoría de las estrellas de la Vía Láctea no superan ese límite, así que, como el propio Sol, acabarán como enanas blancas.



A la izquierda, esquema de lo que sucede a los electrones de una estrella normal: estos se distribuyen de manera espaciada en distintos niveles energéticos. En el caso de una enana blanca (derecha), todos los niveles energéticos están ocupados.

en algunos casos. Sin embargo, cuando la masa que se contrae es superior —tras la expulsión de la mayor parte de la materia de la estrella por la explosión de supernova que normalmente acompaña a la contracción— a unas tres masas solares no hay nada que hacer: la gravedad acaba por ganar la partida y se creará un agujero negro.

LA GRAVEDAD PREDICE SU PROPIO FALLO

La existencia de agujeros negros era vista con horror por la mayoría de físicos relativistas. No se trataba de una aversión estética ni de una objeción filosófica: si los agujeros negros existen, la teoría de la relatividad general conduce, en cierto sentido, a su propia negación.

Antes de hablar de por qué un agujero negro causa tantos problemas a la teoría que lo predice, hay que volver un instante al principio de equivalencia. Hay varias formulaciones de ese principio que son intercambiables. Y una, en especial, es la que acaba por tener consecuencias nefastas. Según el principio de equivalencia, un observador en caída libre tendría que sentir lo mismo que otro moviéndose en línea recta por el espacio, lejos de cualquier objeto masivo. Hay otra forma de enunciar lo mismo, usando el lenguaje geométrico de la curvatura, y es la siguiente:

Un espacio-tiempo plano como el de la relatividad especial vale para describir localmente de forma aproximada cualquier región de cualquier espacio-tiempo curvo que sea una solución de las ecuaciones de la relatividad general.

Aunque una superficie bidimensional sea curva, si nos fijamos en una región muy pequeña nos parecerá plana, de la misma forma que la Tierra parece plana aunque es en realidad esférica. Una forma de verlo es pensar que, si aumentamos la imagen de una curva lo suficiente, tarde o temprano veremos una recta, por mucha curvatura que haya. Esto se podrá apreciar mejor en la figura 2.

Aunque la imaginación visual ya no dé para tanto, lo mismo valdría para un espacio tridimensional curvo y todavía sigue valiendo para uno de cuatro dimensiones como el que se emplea en las relatividades general y especial, donde el tiempo está diferenciado del espacio en el tratamiento matemático de la geometría.

Recordemos que el principio de equivalencia no es solo una predicción de la teoría de Einstein: es su piedra fundacional. Todas las consecuencias de la teoría se pueden deducir a partir de aplicar a rajatabla el principio de equivalencia. Llevando la idea un poco al extremo, se podría decir que la relatividad general y el principio de equivalencia son una misma entidad.

Volvamos ahora a los agujeros negros. Recordemos que un agujero negro forma un horizonte de sucesos, donde el tiempo parece congelarse. Y que algunas estrellas de masa mucho mayor que la del Sol acaban creando un agujero negro. Como se ha visto anteriormente, la masa curva el espacio-tiempo. Una densidad infinita de masa, como la que se daría en el centro de un agujero negro, tiene que producir una curvatura infinita. El centro del agujero negro es un punto en el espacio donde las leyes físicas conocidas pierden su validez: por eso recibe el nombre de *singularidad*. En una singularidad la curvatura es infinita.

Imaginemos que miramos una superficie curvada tendida ante nuestros ojos, por ejemplo una sábana, una cama elástica o una malla que está hundida por el centro. En el caso del espacio, tridimensional, eso solo se puede hacer ficticiamente, desde una cuarta dimensión espacial que no es real. Por este motivo, en la figura 3 se ha dibujado un corte unidimensional: solo se representa una dirección radial hacia el centro de la malla. Según su peso y tamaño, una piedra hundiría la malla de forma que el perfil no sería como el de la figura: en vez de una punta se vería una línea redondeada. Pero un peso grande y concentrado, alguien que cae desde una gran altura sobre una red de seguridad, por ejemplo, podría darle una forma que se acercase a ser cónica, como en la figura. Desde el punto de vista del espacio exterior, las rectas que recorren la superficie del cono hacia la punta se interrumpen en esta, y mientras que en los demás puntos del cono hay descripciones locales de su entorno indistinguibles entre sí, eso no es posible en la punta.

FIG. 2

Un espacio curvo es localmente plano.

FIG. 3

Como la punta de una malla, vista desde el espacio exterior, deformada al caerle un cuerpo pequeño pero pesado, el centro de un agujero negro, su «singularidad», es un punto excepcional, pero dentro del propio espacio: en la singularidad, la curvatura intrínseca es infinita y no es posible recuperar a ninguna escala la normalidad a su alrededor.

En la singularidad de un agujero negro, pero dentro del espacio mismo y no desde otro espacio exterior, imaginario, también se interrumpen las trayectorias de las partículas: el mundo, en cierto sentido, acaba allí. Recordemos que el principio de equivalencia nos dice que todo punto en un espacio curvo puede ser lo-

calmente aproximado por un plano. Esto vale en cualquier lugar que escojamos, dentro o fuera del horizonte de sucesos; en la singularidad del agujero negro, en cambio, da igual cuánto aumentemos: no lo lograremos. El centro de un agujero negro vulnera el principio de equivalencia. La relatividad general de Einstein predice su propio fallo.

Si la relatividad general hubiera sido una teoría matemática, habría habido que desecharla. Lo mínimo que se puede exigir a una teoría es que no se contradiga. En el caso de la relatividad, el problema es aún mayor: predice una situación que contradice su principio fundacional. Esto nos indica que no puede tratarse de la teoría correcta de la gravedad.

Por suerte, la física no se rige por los mismos criterios que la matemática. El descubrimiento de que las singularidades eran inevitables fue un mazazo, sí, pero no dio al traste con la relatividad general. En lugar de eso, el resultado se interpretó como una señal de que, en la singularidad, tiene que haber nueva física. En otras palabras, la relatividad general es una buena aproximación a otra teoría, aún desconocida, que sea capaz de explicar lo que realmente sucede en el centro de un agujero negro. La teoría de cuerdas es un candidato a esa teoría hipotética. Lo que sí está claro es que la existencia de agujeros negros nos muestra que la relatividad general de Einstein no puede ser la última palabra sobre la gravedad. El principio holográfico es considerado el primer paso sustancial hacia la superación de la relatividad general.

CAYENDO A UN AGUJERO NEGRO

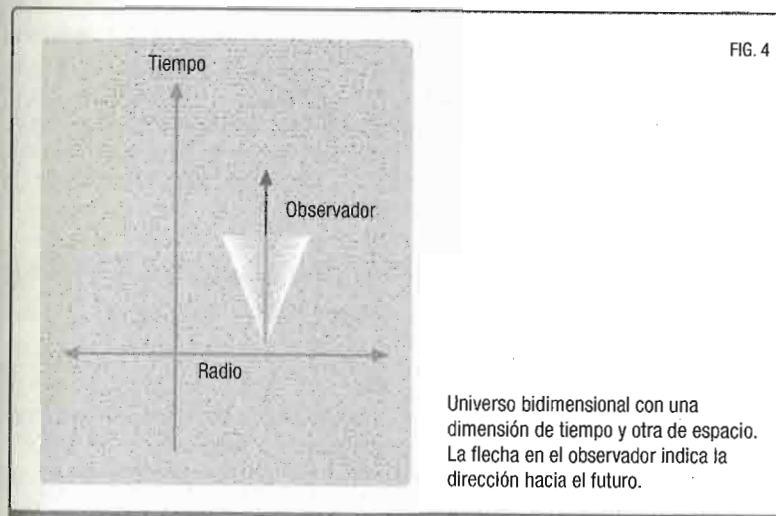
Para quien observa desde lejos, el tiempo parece congelarse en el horizonte de sucesos. Sin embargo, eso es solo lo que ve un observador externo: la persona que cae no nota nada especial al cruzar el horizonte de sucesos, sino que se limita a seguir acercándose a la singularidad hasta que, descompuesto ya por las fuerzas de marea, entra inevitablemente en ella.

Si esto suena contradictorio es porque en un sentido lo es: el observador que cae y el que se encuentra fuera observan situa-

ciones distintas. Sin embargo, dado que es imposible transmitir información de dentro afuera, no hay contradicción experimental alguna: no hay ningún experimento posible en el que ambas historias ocurran a la vez.

Volviendo a la persona que cae: seguirá moviéndose hacia el centro hasta que llegue, inevitablemente, a él. ¿Cómo es posible? ¿No se para el tiempo en el horizonte de sucesos? La clave es que el paso del tiempo depende de quién lo mida. Recordemos que en la relatividad no se habla de espacio y tiempo, sino de espacio-tiempo, lo que significa que espacio y tiempo son parte de una misma entidad y pueden transformarse mutuamente. De hecho, lo que parece tiempo a un observador parecerá espacio para otro y viceversa.

Una forma sencilla de imaginar esto es un universo bidimensional, donde la dirección hacia arriba corresponde al tiempo y la horizontal, al espacio, en concreto a una distancia, un radio, a un centro, por ejemplo el centro de una estrella o de un agujero negro, como se puede ver en la figura 4. El esquema corresponde a un espacio plano en el que no hay masas que lo curven. En él, todo observador que se mueva a la misma velocidad observará las mismas coordenadas de tiempo y espacio. Sin embargo,



MÉTRICA Y CURVATURA

El concepto de curvatura en un espacio se puede hacer más preciso partiendo de la idea típica de distancia y modificándola paulatinamente. En geometría clásica, la distancia entre dos puntos en dos dimensiones viene dada por el teorema de Pitágoras. Todo lo que hay que hacer es fijarse en las distancias horizontales y verticales y luego encontrar la hipotenusa, como se muestra en la figura 1. Podemos escribir esto matemáticamente, bautizando las distancias horizontal y vertical como Δx_1 y Δx_2 , respectivamente. En este caso, hemos bautizado x_2 a lo que se suele llamar la coordenada y porque hace más fácil la generalización más adelante. Si llamamos s a la distancia entre los dos puntos, obtenemos:

$$s = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2}.$$

La primera modificación que uno puede hacer de la fórmula anterior es añadir una dimensión más. Esto nos permitirá, por ejemplo, calcular distancias en tres dimensiones:

$$s = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2}.$$

El siguiente paso es añadir el tiempo. En la relatividad especial, el tiempo se comporta como una dimensión más, con una salvedad: en lugar de que el cuadrado de su intervalo se sume a los de las demás coordenadas, se resta. Además, dado que tiempo y espacio no tienen las mismas unidades, tenemos que usar algún truco para dar al tiempo unidades de espacio. En este caso, el factor de conversión es la velocidad de la luz, c , que nos permite transformar los segundos transcurridos en los metros que la luz recorre en ese tiempo. Obtenemos lo siguiente:

$$s = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 - c^2 \Delta t^2},$$

donde las rayas verticales indican que se tome el valor absoluto, es decir, obviando el signo menos si el valor entre las rayas es negativo, como ocurre con los desplazamientos de cualquiera que se mueva más despacio que la luz, es decir, de cualquier cosa que no sea la luz. Esta forma de calcular la distancia fue desarrollada por el físico Hermann Minkowski (1864-1909) y a este tipo de espacio que incluye el tiempo con la distancia calculada con la fórmula anterior se le llama *espacio-tiempo de Minkowski*. La distancia que acabamos de definir describe un espacio plano, con la única peculiaridad de que tiene en cuenta el tiempo. Sin embargo, una vez escrita la distancia de esta forma, es fácil modificarla para obtener distintos espacios con propiedades diferentes. La modificación más obvia es simplemente permitir que cada uno de los factores vaya multiplicado por un número al inicio, lo que nos permite dar más o menos importancia a cada dimensión. Por ejemplo:

$$s = \sqrt{a_1 \Delta x_1^2 + a_2 \Delta x_2^2 + a_3 \Delta x_3^2 - a_4 c^2 \Delta t^2}.$$

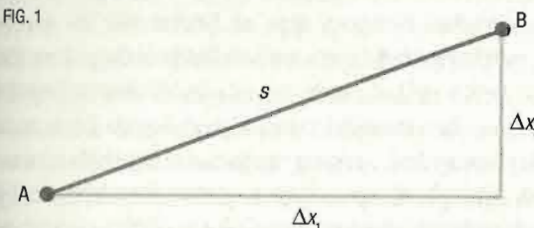
Los coeficientes a_i pueden ser constantes, pero también pueden variar con la posición. Este es el caso de la relatividad general, donde la curvatura cambia según la distribución de la materia y de la energía en el universo.

Otra modificación, algo menos obvia, es cambiar de coordenadas. Como hemos dado nombres genéricos a las nuestras, podemos fácilmente cambiárselos. En física, las coordenadas más utilizadas son las esféricas, que nos permiten describir situaciones esféricamente simétricas, como por ejemplo la rotación de los planetas. En coordenadas esféricas, en lugar de hablar de x , y , z hablamos de la coordenada r , que nos indica la distancia al centro de la estrella, la coordenada θ , que es nuestro ángulo vertical, y la coordenada ϕ , que describe el ángulo horizontal. La geometría fuera y dentro de un agujero negro del tipo más simple, la llamada solución de Schwarzschild de las ecuaciones de la relatividad general, o métrica de Schwarzschild, viene descrita precisamente por estas coordenadas, con una longitud s que es modificada por la distancia radial a la singularidad. En este caso, la distancia es:

$$\Delta s = \sqrt{\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)c^2 \Delta t^2 + \left(\frac{\Delta r^2}{1 - \frac{2GM}{rc^2}}\right) + r^2 \Delta \theta^2 + r^2 \sin^2 \theta \Delta \phi^2},$$

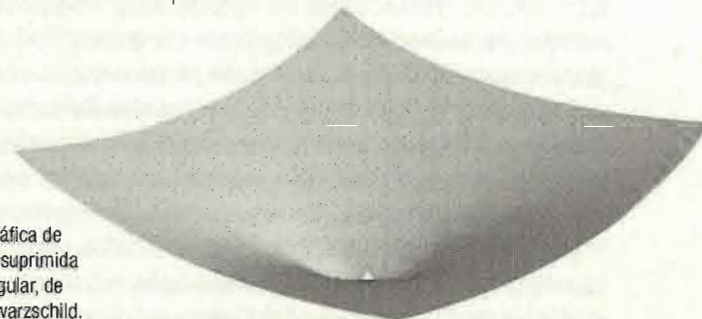
donde M es la masa del agujero negro y G es la constante de la gravitación universal. Esta geometría describe un espacio tridimensional equivalente a la representación bidimensional que se muestra en la figura 2.

FIG. 1



La distancia s entre los puntos A y B corresponde a la hipotenusa del triángulo.

FIG. 2



Representación gráfica de un corte espacial, suprimida una dimensión angular, de la métrica de Schwarzschild.

el efecto de la presencia de un agujero negro es curvar el espacio-tiempo de tal forma que más allá del horizonte de sucesos la coordenada de espacio adquiere las características que más acá del horizonte tiene la de tiempo. La idea se entenderá mejor con

Una concepción errónea muy frecuente es que un agujero negro está hecho de materia que ha sido comprimida hasta un tamaño muy pequeño. Eso no es así. Un agujero negro está hecho de espacio y tiempo deformados.

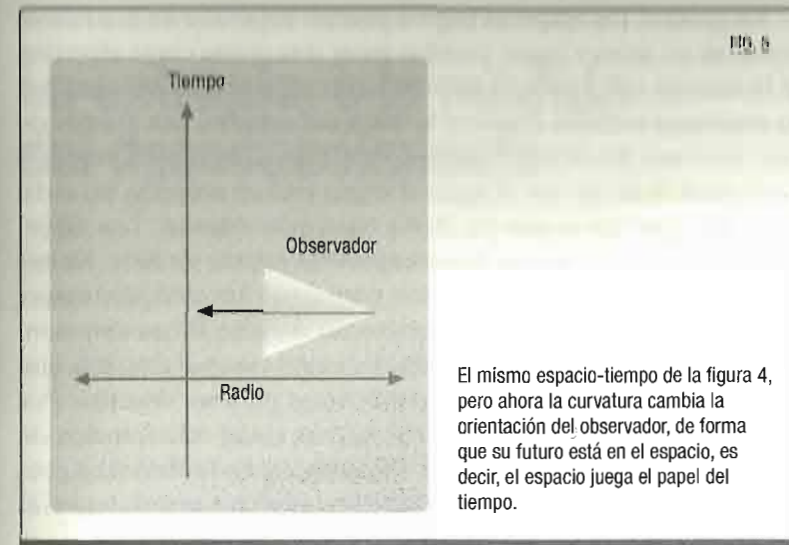
KIP THORNE

ayuda de la figura 5. Desde la perspectiva del observador que está lejos del agujero, la persona en las inmediaciones del horizonte de sucesos parece estar parada. En cambio, para esta, el movimiento no ha cesado, pero dentro del agujero las coordenadas temporal y radial han invertido sus papeles, de forma que la coordenada radial se porta como fuera del agujero la del tiempo: igual que no podemos dejar de avanzar hacia el futuro, quien

ha caído en el agujero seguirá moviéndose hacia la singularidad haga lo que haga, por mucha energía que quiera gastar en evitarlo, a pesar de que el observador del exterior no lo verá nunca.

Esta rigurosa capacidad censora que el horizonte de suceso tiene para los observadores externos ha hecho pensar a Leonard Susskind, por fenómenos relacionados con ella de los que hablaremos más adelante, en la necesidad de un *principio de complementariedad de los agujeros negros*, íntimamente relacionado con el principio holográfico. Este nos dice que el estado de lo que ha caído en el interior de un agujero negro se podría reconstruir, aunque fuese solo en principio, con una cantidad de información proporcional al área del horizonte de sucesos en vez de al volumen del agujero, y que incluso podría estar almacenada en el horizonte de sucesos mismo. Según un observador externo, toda materia que llega al agujero negro quedaría atrapada en su superficie. Por otro lado, una persona que cayese hacia la singularidad observaría una región tridimensional. Dado que la información sobre el sistema tiene que ser la misma lo miremos como lo miremos, podemos deducir que la superficie del horizonte de sucesos tiene que contener la misma información que el interior del agujero. En esa inocente observación se halla el embrión del principio holográfico.

ha caído en el agujero seguirá moviéndose hacia la singularidad haga lo que haga, por mucha energía que quiera gastar en evitarlo, a pesar de que el observador del exterior no lo verá nunca.



LOS OBJETOS MÁS SIMPLES DEL UNIVERSO

Hay otra propiedad de los agujeros negros que los convierte en el candidato ideal para estudiar la gravedad cuántica: no hay objetos más simples, excepto las partículas elementales. Cuando se crea un agujero negro, no hay forma de conocer desde fuera su interior: todo lo que hay es un horizonte de sucesos cuyo radio viene dado por la masa que lo ha creado. Por lo tanto, las propiedades de los agujeros negros más simples que pueda haber dependen exclusivamente de su masa. Solo se necesita un número para describir una región del espacio que ha agregado a su interior un número enorme de partículas. Resulta una simplificación notable, si lo comparamos por ejemplo con la compleja estructura del Sol o de la Tierra, que tienen masas mucho menores. Parece como si todo detalle microscópico desapareciese al crearse el agujero y todo lo que quedara fuese un horizonte de sucesos. Si tomamos dos estrellas cualesquiera con la misma masa, veremos que son distintas. En cambio, dos agujeros del tipo más simple que tengan la misma masa serán indistinguibles.

En general, los agujeros negros pueden depender de dos números más: en primer lugar, podrían tener una cierta carga eléctrica si la materia que los ha formado estaba cargada. En este caso, necesitaremos también conocer la carga del agujero. Los objetos de este tipo son llamados *agujeros negros de Reissner-Nordström*. Otra posibilidad es que el agujero negro esté en rotación, en cuyo caso decimos que posee un cierto *momento angular*. Los agujeros negros de este tipo se llaman *agujeros negros de Kerr*. En general, basta con esos tres números para describir cualquier agujero negro: la masa, la carga y el momento angular. En este sentido, se parecen mucho a una partícula elemental como el electrón, que requiere la misma cantidad de parámetros para ser descrito. Por eso se conjetura que los agujeros negros están relacionados de alguna forma con las partículas elementales; se ha llegado a proponer que las partículas elementales son agujeros negros o que, al menos, algunos agujeros negros son partículas elementales.

INFORMACIÓN EN UN AGUJERO NEGRO

Dado que los agujeros negros son los objetos más simples del universo, ¿qué ocurre con la información que contenía la estrella que lo formó y la materia que se le haya ido agregando después? Hoy en día se ha planteado y adquirido peso la idea de que la información no se pierde, sino que queda almacenada de algún modo en su superficie. Sin embargo, durante años se creyó que la información o bien se guardaba en la singularidad o bien se perdía para siempre.

Otras especulaciones afirmaban que, al otro lado de la singularidad, la materia emergía en otra parte de nuestro espacio-tiempo o, incluso, en un nuevo universo. De esta forma, la información no se perdía, sino que se usaba para crear otro cosmos.

A la respuesta a estas preguntas se han dedicado décadas de investigación en las que los físicos pusieron a prueba los límites tanto de la relatividad general como de la mecánica cuántica, hasta llegar al principio holográfico, un primer paso hacia la unificación de ambas teorías.

La entropía, o la medida del desconocimiento

La noción de entropía surgió durante el siglo XIX, a raíz del estudio de las máquinas de vapor, pero el concepto se ha ido refinando hasta la versión actual, que lo relaciona con la cantidad de información de un sistema. El estudio de la entropía en los agujeros negros dio lugar al principio holográfico.

¿Se puede construir una máquina de vapor perfectamente eficiente? Esta sencilla pregunta tiene una respuesta negativa y acaba por dar lugar a lo que hoy se conoce como la *segunda ley de la termodinámica*. Esta nos dice que la energía en un sistema tiende a disiparse, es decir, a transformarse de formas más útiles a otras menos útiles. Por ejemplo, en una máquina de vapor la energía se halla inicialmente concentrada en el carbón, en forma de energía química: la combustión del carbón calienta agua, que se usa para mover el pistón y hacer trabajo útil, pero parte de la energía se malgasta calentando la caldera y el aire, así como en la fricción entre los engranajes. Esa energía perdida es irre recuperable: acaba disipándose entre todos los átomos y moléculas que constituyen el aire que rodea la máquina. Una parte significativa de la energía útil se ha perdido a todos los efectos.

Esto no es un caso especial, sino que pasa en todo proceso físico: la energía útil disminuye, se dispersa para convertirse en energía térmica del ambiente. Algo que estaba concentrado en un punto acaba repartido por todo el espacio: ha aumentado el desorden.

La *entropía*, tal y como fue definida en sus inicios, se refería al grado de dispersión de la energía en un sistema. A más dispersión, más entropía. La entropía permitió la formulación final de la segunda ley de la termodinámica, que reza así:

La entropía de un sistema cerrado solo puede aumentar o permanecer constante.

Esto coincide con lo que observamos en nuestro día a día. Un vaso de té caliente se enfría y su energía acaba dispersa por el ambiente. El humo de una vela se disuelve en el aire de nuestra habitación. De formas más concentradas de energía se pasa a formas más enrarecidas. El aumento constante de la entropía nos dice que nuestro universo se vuelve cada vez más homogéneo: en algún momento del futuro, todo el cosmos tendrá el mismo aspecto (y será, por lo tanto, más desordenado, en el sentido de que toda estructura, toda forma de ordenación, habría desaparecido de él).

La definición rigurosa de entropía está relacionada con la temperatura de un sistema y la energía que se le proporciona. Cuando añadimos energía a un cuerpo, su entropía aumenta. Eso se debe a que esa energía se usa para mover partículas y, cuanto más desordenadas estén esas partículas, más entropía tendremos. Sin embargo, el aumento de la entropía no será igual para cada cuerpo: en general, cuanto más frío esté un cuerpo, más se notará el cambio que produce una misma cantidad de energía que se proporcione y más aumentará su entropía. Por ejemplo, si tenemos hielo y lo ponemos en el fuego durante cinco minutos, el cambio en su entropía será mucho mayor que si ponemos agua, ya que el hielo es un objeto ordenado y su transformación en líquido cambia radicalmente la estructura, mientras que calentar el agua solo hace que las moléculas se muevan un poco más rápido.

Así pues, si deseamos conocer la entropía de un cuerpo, tenemos que saber tanto su temperatura como la forma en que cambiaría al añadirle energía. La relación entre temperatura y entropía es estrecha: cualquier cuerpo con temperatura tiene entropía y viceversa.

ENTROPÍA Y FÍSICA ESTADÍSTICA

El surgimiento de la física estadística durante el siglo XIX dio una perspectiva completamente distinta sobre el significado de la entropía. Fue el austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) quien le dio su forma actual. Según la física estadística, tanto la temperatura como la entropía no son más que manifestaciones macroscópicas de una realidad microscópica. Es decir, todos los conceptos que asociamos al calor pueden ser descritos en términos del movimiento de los átomos y moléculas que constituyen un cuerpo.

La temperatura de un cuerpo es una medida de la velocidad de las partículas en él. Para ser más exactos, la temperatura está relacionada con la *energía cinética* de las moléculas, que se calcula como un medio de su masa por la velocidad al cuadrado. Cuando decimos que un cuerpo está caliente, en realidad estamos haciendo una afirmación sobre el movimiento de las partículas que lo constituyen. El calor y la temperatura pueden ser reducidos a movimiento.

Expresar la entropía en términos de las partículas microscópicas de un cuerpo es algo más complejo. Boltzmann se dio cuenta de que los estados de entropía alta son más probables que los de entropía baja: por ejemplo, si añadimos leche a nuestro café, nos sorprendería mucho que no se hubiera disuelto al cabo de unos minutos. Partiendo de esta idea, llegó a la conclusión de que la entropía de un cuerpo tenía que estar relacionada con la probabilidad de su configuración molecular. Cuanto más probable fuera una cierta configuración, mayor sería la entropía del sistema que la tuviese.

Pongamos por ejemplo un gas en un contenedor. Hay un sinnúmero de maneras en las que podemos organizar sus moléculas. Por ejemplo, podríamos ponerlas todas en un pequeño cubo en la esquina superior izquierda. También podemos esparcirlas de forma homogénea por todo el contenedor. ¿Cuál de esas opciones es más probable? Para hallar la respuesta, debemos considerar las distintas posibilidades que darán lugar a cada una de ellas. En el primer caso, podemos intercambiar la posición de dos moléculas, sin que cambie lo que observamos desde un punto de

vista macroscópico. De hecho, hay una gran cantidad de formas de reorganizar nuestras moléculas que darán lugar a la misma apariencia a gran escala. Sin embargo, hay muchísimas más maneras de esparcir nuestras partículas si disponemos de todo el contenedor, ya que en este caso tenemos más opciones al intercambiar dos moléculas. Así pues, desde un punto de vista puramente probabilístico, es de esperar que el gas se encuentre en el tipo de configuración más probable, aquel en el que las moléculas se han esparcido por todo el contenedor.

Boltzmann definió la entropía como el logaritmo del número de estados microscópicos de un sistema tales que cada uno de ellos podría ser el que corresponde a lo que observamos a simple vista. Para coordinar esta definición con la definición de entropía de Clausius, basada en las magnitudes termodinámicas de calor y temperatura, ese valor se multiplica por la llamada constante de Boltzmann; en adelante la pasaremos por alto. En cuanto al logaritmo, veremos enseguida su porqué. Cuantas más configuraciones microscópicas haya que sean compatibles con lo que estamos viendo, más entropía tendrá nuestro sistema. La definición de Boltzmann da una explicación a la segunda ley de la termodinámica en términos de átomos y moléculas: las leyes del calor se pueden reducir a las leyes del movimiento.

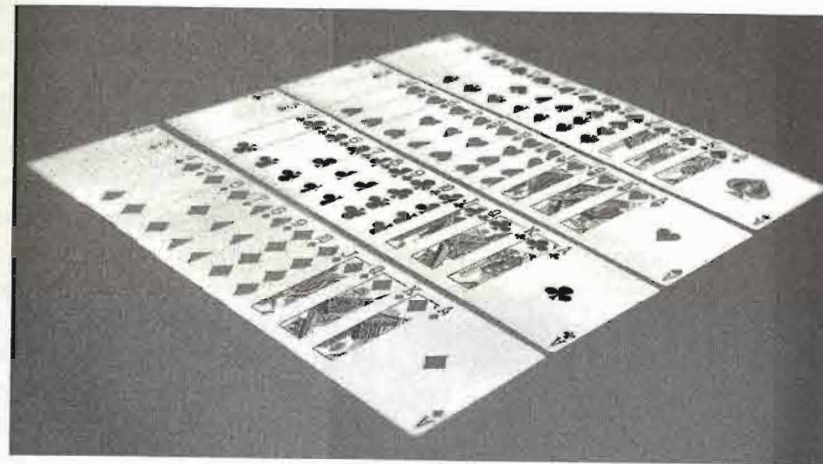
Usando la idea de Boltzmann, podemos intentar hallar la entropía de un agujero negro bajo la suposición de que, dado que no tiene partes móviles y toda su masa está en el centro, hay exactamente una configuración microscópica compatible con lo que vemos. Según la definición de entropía por Boltzmann, la entropía de un agujero negro tendría que ser entonces exactamente igual a cero. Pero hay un problema: si esto fuese así, no se cumpliría la segunda ley de la termodinámica, que afirma que la entropía siempre aumenta. Una posibilidad sería que la segunda ley se equivocase; otra, que la descripción de los agujeros negros que nos ofrece la relatividad general no sea completa. En el segundo caso, necesitaremos tener en cuenta la mecánica cuántica para llegar a una respuesta. El trayecto nos adentrará en las contradicciones entre mecánica cuántica y relatividad general y nos llevará, tras un largo camino, al principio holográfico.

ENTROPÍA Y DESORDEN

La relación entre entropía y desorden se puede ver claramente pensando en una baraja de cartas de póker. Empecemos con una baraja ordenada, donde las cartas se suceden en orden creciente y separadas por palos. Tenemos trece cartas de cada palo y cuatro palos, para un total de 52 cartas. Supongamos ahora que barajamos las cartas, de forma que acaban en un cierto orden aleatorio. Nos preguntamos por la probabilidad de obtener la configuración inicial. Para ello, tenemos que ver cuántas combinaciones posibles existen. Empecemos por la primera carta. Tenemos 52 cartas para elegir, así que existen 52 posibilidades para esta. Para la segunda carta nos quedan solo 51, ya que hemos usado la primera. Así que, para las dos primeras cartas, tenemos un total de $51 \cdot 52 = 2652$ posibilidades. Para la tercera carta nos quedan 50 posibilidades y así sucesivamente, hasta llegar a la última, donde solo tenemos una opción. Así pues, el número total de combinaciones es:

$$52 \cdot 51 \cdot 50 \cdot 49 \cdot 48 \cdot 47 \cdot 46 \cdot 35 \dots \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 = 8 \cdot 10^{67}.$$

Se trata de un número enorme. Para ver cuánto, supongamos que probamos una combinación por segundo. En este caso, tardaríamos aproximadamente $2 \cdot 10^{50}$ veces la edad del universo en volver a obtener la configuración inicial. Las configuraciones desordenadas son enormemente más probables que las ordenadas, de forma que debemos esperar, en general, que el universo siempre tienda a las desordenadas, porque son muchísimo más probables.



Una baraja de cartas ordenada. Obtener este orden en concreto tiene una posibilidad entre $8 \cdot 10^{67}$.

ENTROPÍA E INFORMACIÓN

La definición de Boltzmann tiene algo de subjetivo: se refiere a lo que observamos macroscópicamente, es decir, a la información que tenemos sobre un cierto cuerpo. Puede parecer un poco extraño que una ley física dependa de algo tan poco físico como la persona que realiza la observación. Esto se explica porque la segunda ley no es una ley fundamental, sino que se deriva de los principios de la mecánica y de la estadística: en este sentido, es perfectamente razonable que se refiera a la información que posee el observador, ya que la ley misma habla de cómo se comportan las características macroscópicas del cuerpo y no de su estructura microscópica.

Podemos llevar esta idea un poco más allá, preguntándonos cuánta información necesitaríamos para especificar la posición y velocidad de cada molécula que constituye el sistema que estudiamos. La entropía nos dice cuántas configuraciones microscópicas dan lugar a las cantidades que estamos observando: si queremos saber en cuál de ellas se encuentra nuestro sistema, tenemos que escoger una. Cuantos más estados posibles haya, más información se necesitará para especificar aquel en el que se encuentra nuestro sistema: por lo tanto, a mayor entropía, más información nos falta.

El razonamiento anterior se verá más claro con un ejemplo. Supongamos que observamos un sistema con dos estados posibles (podría ser la cara y la cruz de una moneda). Para describir en qué estado se encuentra, necesitamos un bit: o cero o uno (véase la tabla de la página siguiente). No es mucha información. Del mismo modo, nuestro sistema tampoco tiene mucha entropía: si solo sabemos que se ha arrojado la moneda al aire, pero no si ha salido cara o cruz, será uno, que coincide con el número de bits que necesitamos para especificar su estado microscópico.

En cambio, ¿qué sucede si nuestro sistema tiene cien partículas, cada una con dos estados posibles, independientes entre sí? Habrá 2^{100} (un número enorme) de estados posibles; para especificar en qué estado se encuentra necesitaremos, pues, cien bits, es decir, cien símbolos que tomen o el valor uno o el valor cero.

| 1 bit | 2 bits | 3 bits | 4 bits |
|-------|--------|--------|--------|
| 0 | 00 | 000 | 0000 |
| 1 | 01 | 001 | 0001 |
| | 10 | 011 | 0011 |
| | 11 | 010 | 0010 |
| | | 100 | 0100 |
| | | 101 | 0101 |
| | | 110 | 0110 |
| | | 111 | 0111 |
| | | | 1000 |
| | | | 1001 |
| | | | 1011 |
| | | | 1010 |
| | | | 1100 |
| | | | 1101 |
| | | | 1110 |
| | | | 1111 |

Número de posibles estados en un sistema con una, dos, tres y cuatro partículas, respectivamente, con dos estados posibles cada una. El número de bits indicado en cada columna coincide con el número de partículas del sistema. Se observa que a cada nueva partícula el número de bits se duplica.

Podría ocurrir que solo supiésemos cuántas caras han salido al arrojar las cien monedas al aire. Hay, por ejemplo, un número, que está entre 2^{96} y 2^{97} , de combinaciones de cien monedas tales que la mitad son cara y la mitad, cruz (más exactamente, alrededor de un ocho por ciento de la 2^{100} combinaciones). Para codificarlas, pues, nos sobraría con 97 bits. En general, del número de estados al número de bits se pasa tomando el logaritmo en base 2. De ahí que la entropía se defina como *el logaritmo* del número de estados (la base del logaritmo no es tan esencial, ya que de una se pasa a otra con una constante): con esta definición, lo que nos señala directamente es la información que nos falta.

LA ENTROPÍA DE SHANNON

El concepto de entropía tiene una versión basada puramente en la teoría de la información, llamada *entropía de Shannon*. A pesar de que se trata de un concepto que, históricamente, parecía compartir con la entropía física solo el nombre, una mejor comprensión de ambas ha hecho que los físicos se den cuenta de que se trata de dos formas alternativas de describir un mismo fenómeno. La entropía de Shannon se basa en la idea de la *compresión*. Un sistema tiene mucha entropía de Shannon si es difícil comprimir la información que contiene y poca si es sencillo. El grado de compresibilidad de un sistema está relacionado, a su vez, con lo imprevisible que sea. La idea se entenderá mejor con un ejemplo. Supongamos que tenemos una cadena de bits que hay que enviar a otra persona a través de algún tipo de canal de comunicación. Nos gustaría que nuestra cadena ocupase el menor tamaño posible, para reducir el tiempo necesario para transmitir la información. Pongamos que tenemos la siguiente cadena:

11111111111111111111

En este caso, en lugar de enviar una ristra de unos, podemos simplemente decir que hay veinte unos y, a partir de ahí, el receptor puede reconstruir el mensaje. Esto lo podemos hacer porque la cadena es muy previsible: si conocemos un bit, conocemos todos los otros. En cambio, esta cadena sería mucho más difícil de resumir:

1000010111011011000

En este caso, no parece haber ningún orden. Los unos y los ceros aparecen aleatoriamente, de forma que son impredecibles. Es precisamente esa imprevisibilidad la que nos impide comprimir la cadena (figura 1): no hay suficiente regularidad como para ello. Para definir la entropía de Shannon, nos fijamos en la probabilidad de obtener el siguiente bit conociendo los anteriores. En una cadena altamente previsible, las probabilidades serán mayores o menores que el 50%; si la cadena es completamente imprevisible, como si hubiera sido generada al lanzar una moneda no sesgada, las probabilidades serán de exactamente un 50%. En el primer caso, cada número contiene algo menos de un bit de información, porque ya tenemos cierta información sobre él antes de verlo; en el segundo, cada número tiene exactamente un bit. Es imposible predecir qué bit vamos a obtener antes de verlo.

Aleatoriedad y física

La noción de entropía de Shannon parece divorciada de la física, pero una inspección más cercana revela los parecidos. En física podemos imaginar un gas como una colección de bits, que representan la posición y velocidad de cada partícula (sustituyendo los valores, pertenecientes a un continuo, con pequeños entornos). Mirando el gas desde fuera, tenemos solo información sobre las características a gran escala del sistema, pero no sobre las moléculas individuales. El hecho de que la posición de esas moléculas sea completamente aleatoria es lo que da al gas su enorme entropía, mucho mayor que, por ejemplo, en un sólido, donde las moléculas están ordenadas y, por lo tanto, podemos predecir su posición con alta probabilidad (figura 2).

FIG. 1

Una cadena de bits obtenida lanzando una moneda sin sesgo tiene una cantidad de información igual a su longitud, ya que cada bit es aleatorio.

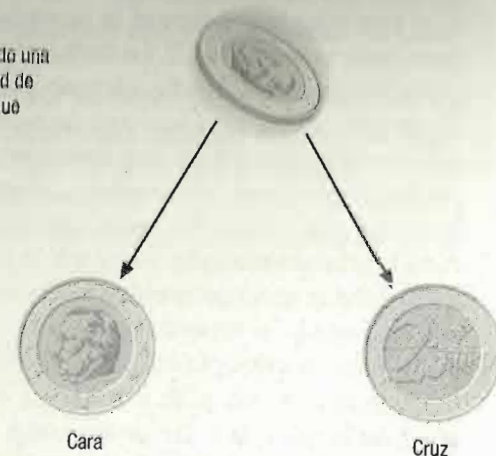
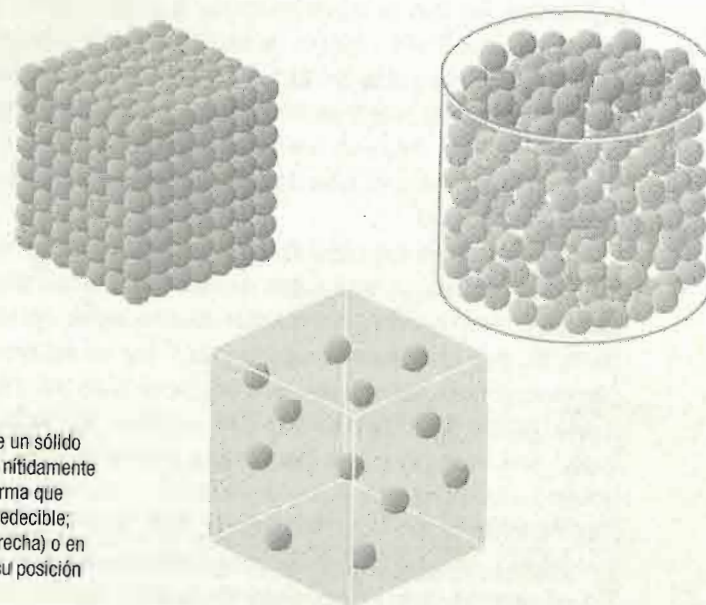


FIG. 2



Las moléculas de un sólido (izquierda) están rígidamente ordenadas, de forma que su posición es predecible; en un líquido (derecha) o en un gas (centro), su posición es aleatoria.

Obsérvese que ese cerca de un ocho por ciento de combinaciones mitad y mitad se convierte en un cerca de un ocho por ciento de probabilidad de que se obtengan cincuenta caras al arrojar al aire cien monedas solamente si la probabilidad de que salga cara es para cada moneda de $1/2$. La definición de entropía de Boltzmann parte de que cada estado microscópico es igualmente probable. Es lo que ocurre con las cien monedas cuando cada una tiene una probabilidad $1/2$ de que salga cara: entonces, es igualmente probable que salgan cien caras a que salga una determinada combinación con cincuenta caras (por ejemplo, que hayan caído de cara la primera moneda, la quinta, la sexta, la novena, etc.), y esa probabilidad igual para todos los estados es de $1/2^{100}$. Pero solo hay un estado correspondiente a que las cien monedas caigan como cara: la entropía del sistema sería en ese caso cero.

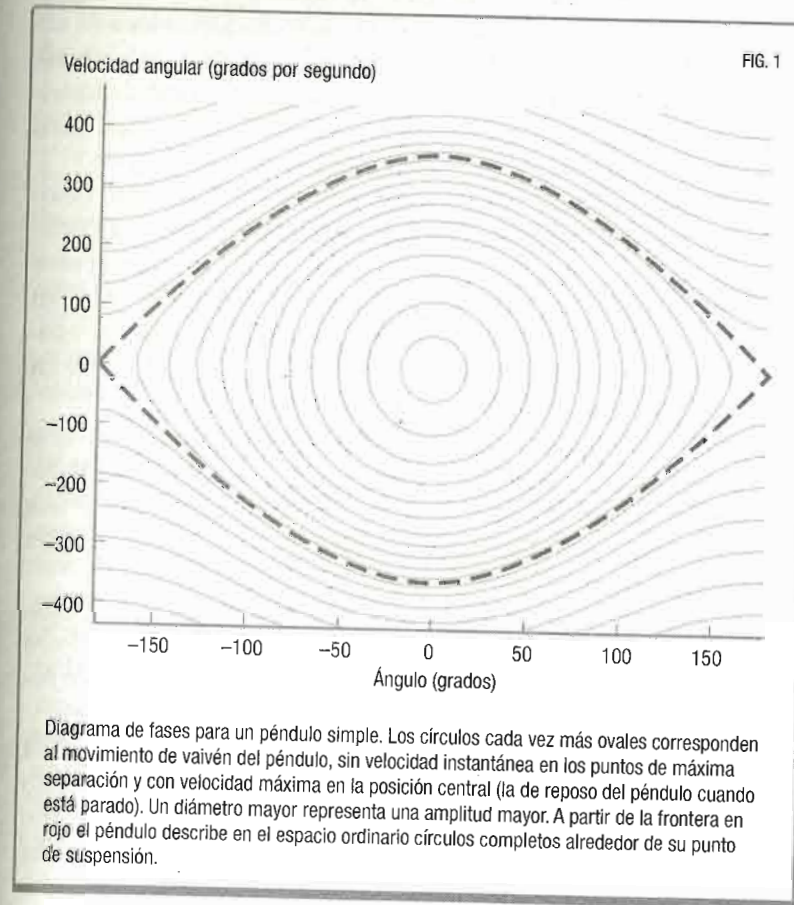
Podemos ir más allá: a pesar de que nos falta información, sí se halla presente. De hecho, está almacenada en el sistema que estamos estudiando. Cada partícula tiene una posición y una velocidad, de forma que almacena la información necesaria sobre sí misma. Por lo tanto, es legítimo decir que la información que nos falta se halla dentro del sistema. Llevando este razonamiento hasta su conclusión lógica, nos damos cuenta de que la entropía de un sistema realmente nos dice cuánta información se encuentra almacenada en este. Entropía e información son un mismo concepto.

Esto resultará especialmente importante en el estudio de los agujeros negros: si uno logra demostrar que no tienen entropía, quedará claro que la información que ha caído en ellos se ha perdido. Si, por otro lado, se demuestra que un agujero negro tiene cierta entropía, significará que contiene más información que su masa, carga y momento angular. ¿Dónde se halla esa información? Esa es la pregunta del millón. Según el principio holográfico, se halla esparcida por el horizonte de sucesos. Sea como sea, hay razones poderosas para creer que la información no puede perderse y que, por lo tanto, los agujeros negros tienen entropía. Como se verá, la conservación de la información constituye uno de los pilares de la física, uno que la comunidad científica es muy reacia a abandonar.

LA CONSERVACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Que la información se conserva es algo sabido desde hace siglos. La primera prueba relacionada con ello es el *teorema de Liouville* de la mecánica clásica.

En la mecánica newtoniana se describe la evolución de un sistema de partículas mediante algo llamado *espacio de fases* (figura 1). Un espacio de fases es parecido al espacio normal, pero incluye también el momento de la partícula, el producto de su masa por su velocidad (entendida como vector, es decir,



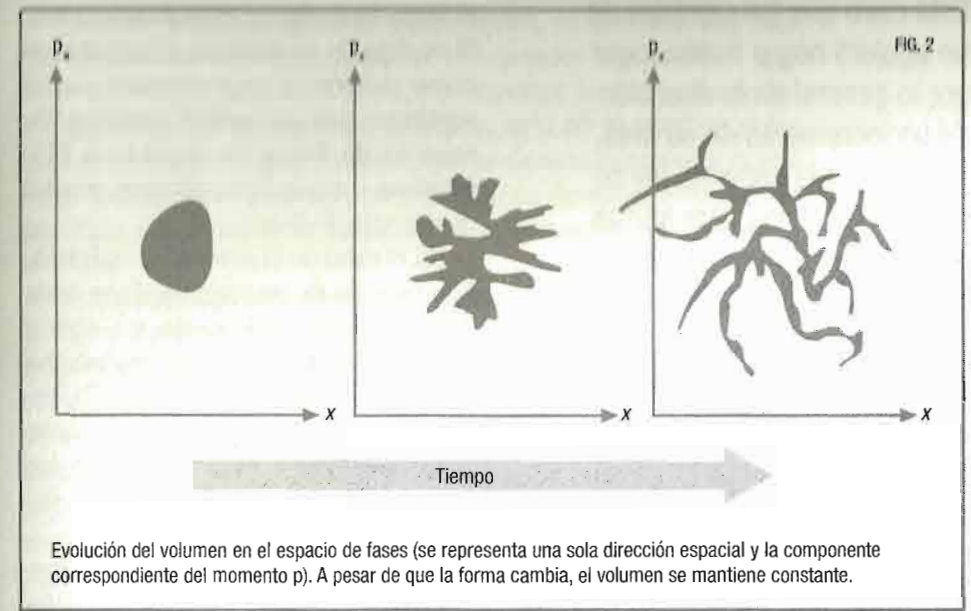
una velocidad con la dirección y el sentido hacia los que se dirige, en el momento que sea, la partícula). Por ejemplo, si una bola de billar se mueve en dos dimensiones, su espacio de fases tendrá cuatro: dos para la posición y dos más para el momento. Además, un espacio de fases puede contener varias partículas, por ejemplo, dos bolas de billar. En ese caso, el espacio de fases tendrá ocho dimensiones: dos espaciales para cada bola y dos para el momento de cada una.

De la misma forma que una partícula describe una trayectoria en el espacio, también describe una en el espacio de fases. A cada instante ocupa un punto diferente, cuya evolución viene dada por las ecuaciones de la mecánica clásica. La evolución entera de un grupo de N partículas puede describirse a través de la trayectoria del punto que lo represente en un espacio de fases de $6N$ dimensiones: tres de la posición espacial y tres de la velocidad para cada partícula en un momento determinado.

Podemos llevar la idea más allá y empezar, no con una posición en el espacio de fases, sino con muchas posibles. Es decir: sabemos que nuestro sistema está en un estado que cae dentro de un cierto rango, pero no sabemos en cuál. En este caso, en lugar de un punto en el espacio de fases, nuestro sistema ocupará un cierto volumen, dado por todos los puntos posibles en un instante determinado, como se muestra en la figura 2.

A medida que nuestro sistema evolucione, cada uno de esos puntos se moverá por el espacio de fases, deformando el volumen original. La forma de nuestro volumen a cada instante nos da las posibles configuraciones del sistema, dados sus posibles estados iniciales.

El teorema de Liouville dice que el volumen se mantiene constante durante la evolución en el espacio de fases. No podría ser válido sin unas leyes físicas deterministas: la idea de que el futuro y el pasado pueden ser reconstruidos a partir del conocimiento exacto del estado presente, o lo que es lo mismo, que el estado de un sistema físico se mueve obligatoriamente a lo largo de una trayectoria única a través del espacio de fases. El teorema de Liouville añade a esto, basándose en cómo determina la mecánica clásica esa unicidad de la trayectoria de los estados,



que la información que poseemos sobre el sistema se conserva. El volumen en el espacio de fases es una forma de expresar el concepto de número de estados cuando existe un continuo de estados posibles (de posición y de velocidad de las partículas que componen el sistema). Cuanto mayor es el volumen, más ignoramos. El teorema dice que esas trayectorias únicas de los estados del sistema incluidas en la región original de nuestra ignorancia no convergen o divergen de forma que el volumen de esa región decrezca o crezca con el tiempo, y por lo tanto decrezca o crezca nuestra ignorancia.

Ahora bien, esto parece que choca con todo lo que hemos estado diciendo de la entropía, que o se mantiene o *crece*. Esta contradicción refleja la tensión que hay entre el determinismo de las leyes de la mecánica, reversibles en el tiempo, y la típica irreversibilidad de los procesos termodinámicos. Una cierta conciliación viene dada por cómo evoluciona el volumen en el espacio fases, tal y como se ve en la figura 2: de un volumen compacto se pasa a un volumen igual en cantidad pero muy extendido por

Está claro que los cambios de un agujero negro tienen lugar por lo general en la dirección de un incremento de su área. Recuerda a la segunda ley de la termodinámica, que afirma que los cambios de un sistema termodinámico cerrado tienen lugar en la dirección de un incremento de su entropía.

JACOB BEKENSTEIN

distintas magnitudes físicas pueden tomar en una medición del sistema cuando se encuentra en ese estado.

El papel del determinismo en la mecánica cuántica le corresponde a algo llamado la *unitariedad* de evolución de la función de onda. La función de onda está concebida de modo que la suma de todas las probabilidades para todos los posibles resultados de las mediciones de una magnitud del sistema tiene que ser igual a uno, y eso debe suceder en todo instante. Eso obliga a que el conjunto de operaciones matemáticas (el «operador») que determina cómo será la función de ondas en el futuro bajo la acción de unas u otras fuerzas, o de ninguna, tenga unas características matemáticas —la «unitariedad»— que, a la vez, garantizan que ese proceso físico sea reversible: a partir del estado futuro se podría recuperar el del pasado.

En este sentido, la mecánica cuántica es tan determinista como la mecánica clásica: la indeterminación se da al realizar una medida, pero la evolución de las probabilidades, si no se interfiere el sistema, se producirá de una forma completamente predecible.

La conservación de la información en mecánica cuántica se traduce en dos teoremas notables sobre los sistemas cuánticos. El primero de ellos, llamado *teorema de no borrado*, nos dice que es imposible borrar información cuántica. Pensemos en

el espacio de fases, muy filamentoso. Si se deja de considerar a los estados como puntos de un continuo y se los sustituye por pequeños parches de espacio de fases, la estructura filamentosamente ocupará un volumen *mayor* de espacio de fases.

En el caso de la mecánica cuántica, la evolución de un sistema viene dada por una función de onda, un objeto matemático abstracto que evoluciona dentro de su propio espacio, llamado *espacio de Hilbert*, y que asigna probabilidades a los valores que las

una pizarra sobre la que hay algo escrito, lo que sea: hay una operación, que consiste en pasar el borrador por encima, que la devuelve a su estado original, sin importar lo que esté escrito en la pizarra. En la mecánica cuántica, esto no es posible: si tenemos un cierto estado cuántico, que podemos interpretar como «algo escrito en la pizarra», no lo podemos devolver a un estado genérico, de «pizarra en blanco». La información no puede ser borrada.

En nuestro día a día observamos centenares de ejemplos donde la información se borra, desde una pizarra hasta el acto de quemar un papel. Sin embargo, desde el punto de vista cuántico, la información sigue ahí: lo que pasa es que ha quedado tan revuelta y esparcida que es, a efectos prácticos, irrecuperable. Esto se aplica directamente a los agujeros negros. Dado que estos pueden ser descritos por solo tres números, parecen un ejemplo perfecto de «pizarra en blanco»: sea como sea la materia ordinaria que lo ha creado o acabado en él, un agujero negro siempre tiene el mismo aspecto. La información ha sido borrada, al menos para los observadores externos. Pero la mecánica cuántica prohíbe que esto suceda, lo que nos enseña que la visión de los agujeros negros como entidades perfectamente simples tiene que estar equivocada. Según la mecánica cuántica, la información tiene que permanecer ahí, oculta de alguna forma: seguirle la pista fue lo que ocasionó el descubrimiento del principio holográfico.

El segundo teorema sobre la información cuántica se llama *teorema de no clonación* y nos dice que es imposible realizar una copia perfecta de un sistema cuántico. Volviendo al ejemplo de la pizarra, la mecánica cuántica nos dice que es imposible realizar una copia de lo que haya escrito, átomo por átomo, electrón por electrón.

Por supuesto, siempre es posible realizar una copia defectuosa: mientras ciertas propiedades del sistema sean distintas, el teorema de no clonación no tendrá efecto alguno. Así pues, en sistemas macroscópicos podemos ignorarlo a todos los efectos. En situaciones que implican a un número reducido de partículas, no obstante, el teorema de no clonación empieza a ser relevante.

Se ha visto que las propiedades de un agujero negro pueden describirse con solo tres números: su masa, su momento angular y su posición. Dadas esas tres cantidades, el agujero negro queda completamente determinado. Pudiera ser que solo hubiese un estado microscópico compatible con esa información externa; la entropía de un agujero negro valdría entonces exactamente cero. Por otro lado, la mecánica cuántica nos dice que eso es imposible, porque la información no puede desaparecer.

Tal vez la mecánica cuántica se equivoque: tal vez, en un agujero negro, la relatividad general gane la partida y la información se pierda para siempre. Puede que el teorema de no borrado deje de funcionar y la función de onda pierda su unitariedad. Pero, si ese es el caso, dejaremos de ser capaces de predecir el futuro o inferir el pasado. La física perdería su poder explicativo. Es un alto precio a pagar por llevar a las últimas consecuencias las ecuaciones de Einstein.

El agujero negro cuántico

Nada puede salir de un agujero negro: no es sino una región de espacio-tiempo que, dada la naturaleza de su geometría, se caracteriza precisamente por eso. Sin embargo, cuando se tienen en cuenta los campos cuánticos, con su creación y destrucción de partículas, se llega a la conclusión de que se emite radiación a expensas del agujero. Se abre así un mundo de paradojas y nuevas ideas.

Las divergencias entre mecánica cuántica y relatividad general llegaron a su punto culminante cuando Stephen Hawking argumentó convincentemente que los agujeros negros se «evaporan», es decir, pierden masa hasta desaparecer (naturalmente, el fenómeno no tiene nada que ver con las evaporaciones de líquidos a las que estamos acostumbrados), y de ahí sacó la conclusión de que la información que haya en ellos se perderá también para siempre. Dado que la conservación de la información es esencial en la mecánica cuántica, se encontró con una resistencia encarnizada.

La segunda ley de la termodinámica dice que la entropía del universo tiene que aumentar siempre. Hoy sabemos que se trata de una ley estadística, que se cumple porque las configuraciones con entropía alta son, por definición, más numerosas que las que la tienen baja. Tenemos algo que parece una perogrullada: el universo evoluciona hacia estados más probables.

Se trata de una ley tan asentada, tanto en la experiencia como en el sentido común, que la posibilidad de que sea vulnerada es difícil de contemplar. Sin embargo, la existencia de los agujeros negros parecía hacer exactamente eso. Un agujero negro no tie-

ne características externas, más que su masa, carga y momento angular. Podríamos, por ejemplo, arrojar un coche entero dentro. El coche tiene entropía; el agujero negro, cabría pensar, no. Una vez ha cruzado el horizonte de sucesos, la entropía del coche se habría perdido: el universo tendría menos que antes. La segunda ley no se cumpliría, sería la conclusión a que se llegaría. La historia del principio holográfico empieza con los intentos de salvar la segunda ley de la termodinámica.

EL AGUJERO NEGRO DE BEKENSTEIN

Para Jacob Bekenstein, la idea de que la existencia de los agujeros negros hace que la entropía del universo disminuya parecía inaceptable. La segunda ley es una de las piedras angulares de la física. A pesar de que uno nunca puede descartar la posibilidad de que algo tan fundamental esté equivocado, hay que considerar primero todas las alternativas posibles. En el caso de los agujeros negros, había una alternativa clara: esos cuerpos, a pesar de las apariencias, poseen entropía. Para Bekenstein, esa suposición era un mal mucho menor que vulnerar la segunda ley.

La señal más clara la daba un teorema recién demostrado por Hawking: el área de los agujeros negros solo podía mantenerse igual o aumentar. La analogía con la entropía era clara. Siguiéndola, Bekenstein definiría en 1973 la entropía de un agujero negro.

Se propuso calcular el aumento en la entropía de un agujero negro a partir de la suposición de que tenía que aumentar en, al menos, la entropía entrante. Para ello se sirvió de un experimento mental, al estilo de los que popularizó Einstein cuando desarrolló sus teorías de la relatividad. Recordemos que la entropía nos dice cuántos bits de información necesitamos para especificar el estado de un cuerpo. La mínima cantidad de entropía que podemos añadir a algo es exactamente un bit: o sí o no. ¿Cómo añadir un bit a un agujero negro?

Podríamos, por ejemplo, arrojar una moneda a su interior. La moneda puede caer en cara o en cruz: dos posibilidades, por lo tanto un bit. Por desgracia, la información contenida en una mo-

neda es mucho mayor; incluye la posición y velocidad de cada una de sus partículas. Necesitamos algo más pequeño.

Otra posibilidad es lanzar un átomo, pero nos vemos con el mismo problema: el átomo está constituido por protones, neutrones y electrones, cada uno con sus posiciones y velocidades. Añadir un átomo a un agujero negro aumentará su entropía en mucho más de un bit. Parece que la única opción es usar una partícula elemental: algo que no pueda ser dividido en partes constituyentes.

Bekenstein calculó cuál era el mínimo aumento posible del área de un agujero negro cuando caía en él una partícula de una cierta masa y un cierto radio, pero sin carga. Para ello, calculó la energía mínima con que la partícula podía entrar en el agujero según las ecuaciones de la relatividad general. La energía, por la equivalencia einsteiniana entre masa y energía, aumentaba la masa del agujero, y por tanto, en ese caso estudiado por Bekenstein, su área (volveremos sobre esto enseguida). Supuso entonces que la partícula tenía un tamaño igual a la llamada longitud de Compton, la longitud de onda de un fotón que tenga la misma energía que la masa de la partícula, ya que, razonó, ese es el mínimo tamaño que puede tener una partícula (la razón tiene que ver con el principio de incertidumbre: si se pudiese precisar la posición de la partícula en un intervalo menor que su longitud de onda de Compton, la incertidumbre en su energía sería mayor que su masa en reposo, con lo que se podría crear una segunda partícula). Una partícula así, seguía su razonamiento, concordaba con la idea de partícula elemental, sin estructura interna alguna. Esa longitud de Compton es el inverso del producto de la masa por la velocidad de la luz multiplicado por la constante de Planck, magnitud cuántica fundamental que relaciona la energía de un fotón con su frecuencia. Obtuvo, el cálculo no es sencillo, que el incremento de área de un agujero negro cuando le cae una partícula así, por lo tanto el menor incremento posible de área de un agujero negro, es del orden del área de Planck. Este concepto se explica un poco más adelante.

Si el incremento mínimo del área equivale a un bit, entonces el área del agujero, es decir, de su horizonte de sucesos, medido en

áreas de Planck, es igual al número de bits de la información que ha caído en el agujero. Y ese número de bits, recordemos, es la entropía. Nos hemos ido comiendo algunos factores constantes. El factor de proporcionalidad que dio Bekenstein entre entropía y área no era del todo correcto. El factor correcto solo lo calculó Hawking posteriormente. Pero Bekenstein acertó en que la entropía de un agujero negro y el número de áreas de Planck de su horizonte de sucesos son esencialmente lo mismo.

En el argumento de Bekenstein aparece un elemento, común a todo cálculo relativista, del que vamos a decir algo aquí: la equivalencia de Einstein entre masa y energía. Se resume en la famosa ecuación de Einstein:

$$E = mc^2.$$

La m que aparece ahí es la masa del cuerpo de que se trate. No depende de quién la mida, es decir, no depende del sistema de referencia que se escoja. La velocidad de la luz al cuadrado, c^2 , es en esta ecuación un factor de conversión entre distintas unidades históricamente empleadas para medir una misma magnitud física, a la que puede llamarse la masa-energía. No quiere decir, entiéndase bien, que energía y masa sean lo mismo (salvo en el sentido de que ambas son formas de la masa-energía). La energía E sí depende del sistema de coordenadas. La ecuación $E = mc^2$ es válida solo en un sistema de referencia donde el cuerpo esté en reposo. En sistemas de referencia que se muevan con respecto a ese a velocidad constante hay que sumar a mc^2 la energía cinética del cuerpo, pero en la relatividad especial esta no depende de la masa del cuerpo y del cuadrado de la velocidad relativa entre el cuerpo y el sistema de referencia, sino de la masa y el cuadrado de la razón entre esa velocidad y la de la luz; la forma de la dependencia es también algo más complicada. Cuando la velocidad es muy pequeña con respecto a la de la luz, se recupera aproximadamente la definición no relativista, es decir, la mitad del producto de la masa por la velocidad al cuadrado.

Un aspecto clave de la equivalencia relativista entre masa y energía es el siguiente: la masa conjunta de un sistema formado por distintos objetos en movimiento entre sí, de forma que no haya ningún sistema de referencia en el que todos estén quietos a la vez, no es la mera suma de las masas de esos componentes, sino que entran también sus energías cinéticas. Así, una caja llena de un gas caliente tendrá más masa que cuando está frío porque las partículas tendrán más energía cinética en el primer caso que en el segundo. La masa así calculada es la masa de la que depende cuánto se acelere un cuerpo sometido a una fuerza y la que ejerce y padece la atracción gravitatoria: es decir, es lo que ordinariamente se entiende por «masa».

Los fotones, las partículas de la luz, no tienen masa, pero sí energía, proporcional a su frecuencia. Esa energía también cuenta, como cualquier otra, en una suma como la anterior. La luz que entra en un agujero negro, por lo tanto, también aumenta la masa de este.

Hemos dicho antes que, en el caso estudiado por Bekenstein, al aumentar la masa del agujero aumenta su radio. Recordemos que en la solución de Schwarzschild a las ecuaciones de la relatividad general, que describe a un agujero negro sin rotación ni carga eléctrica, el radio del agujero era proporcional al doble de su masa. Hay una forma intuitiva, aunque no rigurosa, de calcular esa relación entre masa y radio de un agujero negro de Schwarzschild. Un campo gravitatorio decrece en intensidad a medida que nos alejamos de su fuente: por eso casi no notamos la atracción gravitatoria de la galaxia de Andrómeda, a pesar de que está compuesta por cientos de miles de millones de estrellas. Una persona que se encuentre en la superficie de un planeta puede hacerse la siguiente pregunta: ¿a qué velocidad tendría que ser lanzada hacia arriba para poder escapar del campo gravitatorio del planeta? La respuesta depende de dos factores: por un lado, la masa del planeta en cuestión; por otro, su radio. A esta velocidad se la suele llamar *velocidad de escape*.

La siguiente pregunta que uno puede hacerse es: ¿qué masa tendría que tener la Tierra para que la velocidad de escape en su

superficie fuera igual a la de la luz? En este caso, tendríamos un agujero negro: un lugar del que ni siquiera la luz puede escapar. El cálculo se puede realizar dentro de la mera mecánica newtoniana mediante la conservación de la energía:

$$M = \frac{Rc^2}{2G},$$

donde c es la velocidad de la luz, R es el radio del agujero negro y G es la constante de la gravitación universal. En un orden distinto, es la misma fórmula que hemos escrito un poco más arriba:

$$R = \frac{2GM}{c^2}.$$

El resultado importante ahí es que el radio de un agujero negro de Schwarzschild es proporcional a su masa: si duplicamos la masa del astro, su radio se duplica.

Bekenstein hizo su cálculo para el tipo más general de agujero, con rotación y carga eléctrica. En este caso, no todo ingreso de masa-energía produce un aumento del área del agujero, aunque sí de su masa. Los aumentos de masa que no modifican el área son reversibles: el agujero puede perder esa masa mediante acciones exteriores al agujero que afectan a la carga y rotación de este, es decir, se puede extraer energía del agujero aunque, por supuesto, no saldrá nada desde su interior. En cambio, la llamada masa irreducible del agujero, que no depende de la rotación y la carga, no puede ser extraída de ninguna forma (que no sea la evaporación de Hawking). Esa masa irreducible es la masa del agujero de Schwarzschild que se obtendría al despojar al agujero original de su rotación y de su carga eléctrica. Bekenstein escogió para su cálculo una partícula con tamaño en vez de una puntual porque es posible demostrar que una partícula puntual puede aportar energía al agujero con rotación sin que aumente el área de este y, por lo tanto, el aporte mínimo de una partícula puntual a la entropía es nulo. Con una partícula cuyo tamaño no sea nulo el área, en cambio, crece siempre, según

calculó Bekenstein. Por lo demás, al sostenerse que el tamaño mínimo viene dado por la longitud de Compton tiene poco sentido pensar en partículas puntuales.

Nos falta por aclarar uno de los conceptos que aparecen en el argumento de Bekenstein: el área de Planck. Las unidades de Planck fueron creadas por Max Planck (1858-1947) en un intento de dar con las unidades preferidas por la naturaleza. Planck encontró distintas combinaciones de constantes fundamentales, como la constante de Planck, la velocidad de la luz y la constante gravitatoria, que equivalían a dimensiones de longitud, tiempo o masa. La longitud de Planck, por ejemplo, se considera la mínima longitud posible o, al menos, el punto en el que los efectos gravitatorios tienen que ser tomados en cuenta al realizar cálculos en mecánica cuántica. El área de Planck se obtiene a partir de la longitud de Planck y corresponde al área mínima posible (en ese mismo sentido). Es muy pequeña: del orden de 10^{-70} metros cuadrados.

Puesto que el orden de magnitud del área de un agujero negro de masa estelar viene a ser de millones o decenas de millones de metros cuadrados, la cantidad de bits que puede albergar es enorme. El agujero negro del centro de nuestra galaxia tiene una masa de tres o cuatro millones de soles y un radio de decenas de millones de kilómetros. En el universo visible hay del orden de cien mil millones de galaxias. La entropía encerrada en agujeros negros en el universo visible, tomando el agujero negro de nuestra galaxia como un ejemplo típico, pero se sabe que los hay mucho mayores, es del orden de 10^{101} . En el universo visible hay unos 10^{80} bariones (las partículas formadas por tres quarks, como los protones y los neutrones, y por lo tanto los constituyentes de casi toda la masa de la materia ordinaria del mundo): quiere decir que por cada barión los agujeros negros guardan, en su conjunto, miles de trillones de bits de información.

El descubrimiento de Bekenstein es, pues sorprendente: los agujeros negros no solo tienen entropía, es decir, información, sino que es proporcional a su área, y a un bit de información le corresponde un área del orden del área de Planck, así que acumulan una información ingente.

CONTANDO LA ENTROPÍA DE UN AGUJERO NEGRO

Es relativamente sencillo dar una versión aproximada del cálculo de Bekenstein sobre la relación entre entropía y área de un agujero negro. Ya que en ese cálculo las partículas mínimas consideradas son partículas cuyo tamaño es su longitud de Compton, es decir, la longitud de onda de un fotón cuya energía sea igual a la masa de la partícula, cabe pensar en usar directamente un fotón con la menor longitud de onda posible. Si su longitud de onda es mayor que el agujero, no «entra» a este. Consideraremos, pues, un fotón cuya longitud de onda sea del orden del radio R del agujero negro, que tomaremos como uno de Schwarzschild. La frecuencia se obtiene a partir de la longitud de onda mediante la *ecuación de onda*, que relaciona la frecuencia, la longitud de onda y la velocidad de una onda, como las de la luz. La frecuencia nos dice cuántas crestas vemos cada segundo, y la longitud de onda, la distancia entre dos crestas. Si multiplicamos ambas, obtenemos la distancia que cruza la onda en un segundo, que no es más que la velocidad. Es decir, la frecuencia de una onda multiplicada por su longitud de onda es igual a su velocidad. Aislando la frecuencia, obtenemos:

$$f = \frac{c}{\lambda} \propto \frac{c}{R}.$$

La energía del fotón es proporcional a su frecuencia, siendo la constante de proporcionalidad igual a la constante de Planck. Así pues, la energía del fotón es:

$$E = hf \propto \frac{hc}{R}.$$

Usando la equivalencia de Einstein entre masa y energía, podemos obtener la masa que gana el agujero al tragarse el fotón. Dado que $E = mc^2$, tenemos que:

$$m = \frac{E}{c^2} \propto \frac{hc}{Rc^2} = \frac{h}{Rc}.$$

Ahora que conocemos la masa de un bit de entropía, solo queda contar cuántos bits tiene el agujero negro. Para ello, usaremos la fórmula que relaciona la masa M del agujero con su radio:

$$R = \frac{2GM}{c^2},$$

de la cual podemos aislar la masa y obtener:

$$M = \frac{Rc^2}{2G}.$$

Para encontrar cuántos bits caben en el agujero negro, solo hay que dividir la masa del agujero por la masa que el agujero gana con un bit:

$$N = \frac{M}{m} \propto \frac{\frac{Rc^2}{2G}}{\frac{h}{Rc}} = \frac{R^2 c^3}{2Gh}.$$

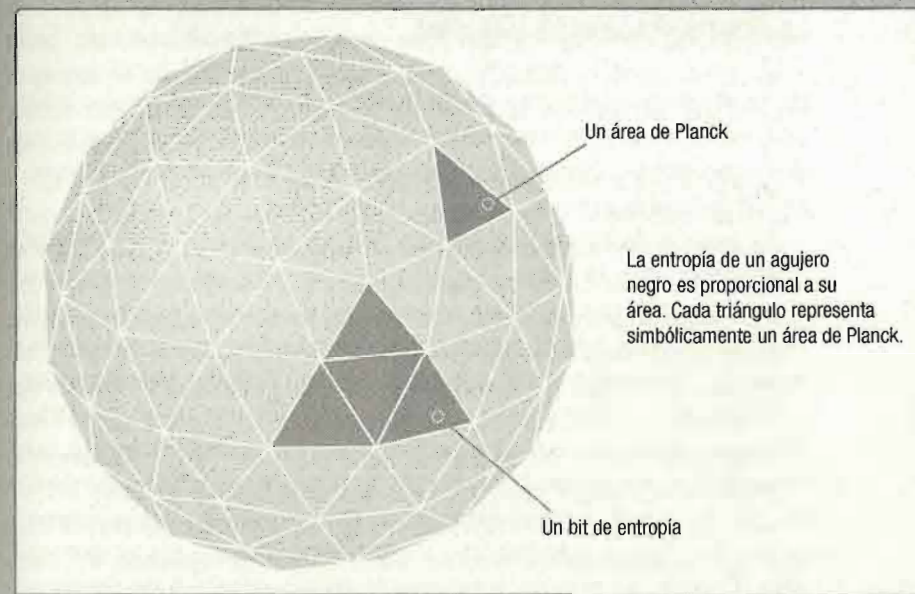
Pero el área de una esfera es $A = 4\pi R^2$, de forma que podemos expresar el número de bits como:

$$N \propto \frac{c^3}{8\pi G h} A.$$

Es decir, el número de bits almacenados en el agujero es proporcional al área de su horizonte de sucesos. Dado que el número de bits es proporcional a la entropía, hemos descubierto que la entropía es proporcional al área. La fórmula que obtuvo Hawking, con la constante de proporcionalidad correctamente calculada, es la siguiente:

$$S = \frac{k_B c^3 \pi A}{2Gh},$$

donde k_B es la constante de Boltzmann, que usamos para transformar los bits en unidades de entropía, que son julios/kelvins. Es notable que, con argumentos cualitativos, hayamos sido capaces de llegar a una fórmula igual en lo esencial. Usando los cálculos de Hawking, vemos que un bit de entropía ocupa cuatro áreas de Planck (es decir, cuatro veces $hG/2c^3$), la unidad natural de área. O más exactamente, sería así si la entropía de Boltzmann se hubiese definido de modo que la entropía de un bit fuese la constante de Boltzmann; en realidad, es la constante de Boltzmann multiplicada por el logaritmo natural de dos. La discrepancia se debe sencillamente a razones históricas: cuando se definió la entropía por primera vez, la información no jugaba un papel tan central como hoy.



Sin embargo, el razonamiento de Bekenstein no convenció a todo el mundo. Si los agujeros negros poseen información, ¿dónde la guardan? Según la relatividad general, el horizonte de sucesos tendría que ser localmente indistinguible de un espacio plano: es decir, un observador que pasara por él no sería siquiera consciente de estarlo haciendo. La información no podría hallarse en el horizonte. ¿Quizá en la singularidad? Pero, en este caso, ¿por qué iba a ser la entropía proporcional al área del horizonte de sucesos?

A pesar de que no todas esas cuestiones quedaron resueltas, el resultado de Bekenstein empezó a ser tomado en serio cuando un joven Stephen Hawking demostró matemáticamente que la temperatura ligada a esa entropía que cambiaba con la masa debía ser tomada en serio: es decir, que había que aceptar que estaba asociada a una emisión de radiación que en última instancia haría que los agujeros negros perdiesen masa y cambiasen de tamaño hasta desaparecer.

LA DEMOSTRACIÓN DE HAWKING

Hawking tomó el argumento de Bekenstein y lo llevó mucho más allá, en un auténtico *tour de force* donde combinó los principios de la mecánica cuántica y de la relatividad general como nunca se había hecho antes.

Ya hemos dicho que la energía de una partícula depende del observador que la mire. Por ejemplo, un tren no tiene energía cinética según una persona sentada en él, porque su velocidad relativa es cero; por el contrario, alguien que se encuentre en la estación observará algo completamente distinto. Sabemos ya también que la energía de un fotón será distinta para observadores situados en distintas partes de un campo gravitatorio no homogéneo. En general, la energía de cualquier partícula se puede dar conforme al comportamiento de los relojes en uno u otro punto del campo gravitatorio, y no valdrá igual según el que se elija. Cuando se intenta combinar la teoría cuántica de campos con los espacio-tiempos de la relatividad general, esta forma de

dependencia que tiene la energía de quién la mida puede convertirse en una relatividad del número de partículas. Así, lo que parece vacío para un observador puede estar lleno para otros. El gran descubrimiento de Hawking fue que tal cosa no solo ocurriría con curvaturas espacio-temporales globales extremas, como las del origen mismo del universo o las de las singularidades de los agujeros negros, ocultas para el resto del universo por el horizonte de sucesos, sino en un universo aproximadamente plano como el nuestro si en él se forman agujeros negros, como es el caso.

Dada la equivalencia entre aceleración y gravedad no sorprende entonces que, sin abandonar la relatividad especial, la toma en consideración de observadores acelerados dé lugar también a la relatividad del número de partículas. En concreto, Stephen Fulling (nacido en 1945), Paul Davies (en 1946) y W.G. Unruh (en 1945) demostraron independientemente que un observador que se mueva aceleradamente en un espacio-tiempo sin gravedad, el espacio-tiempo de la relatividad especial, que es el de Minkowski con el que ya nos encontramos en el capítulo 2, verá, en lugar del vacío, un gas caliente. Dado que un gas caliente emite radiación, un observador acelerado verá que el vacío radia (podría suponerse que esa radiación era solo un artificio derivado de un mero cambio de coordenadas, pero Unruh argumentó en favor de su realidad).

El horizonte de un agujero negro es un caso parecido al descrito por Fulling, Davies y Unruh. De hecho, es un caso idéntico, si nos guiamos por el principio de equivalencia, que afirma que los efectos gravitatorios son indistinguibles de una aceleración, siempre que se tenga en cuenta que en las inmediaciones del horizonte de sucesos la solución de Schwarzschild, que describe el espacio-tiempo alrededor y dentro del agujero, es matemáticamente (no vamos a demostrarlo aquí) como el espacio-tiempo que ve un observador acelerado en el espacio-tiempo de Minkowski, es decir, es igual que la situación considerada por Fulling, Davies y Unruh. Un observador que se mantenga estático justo fuera del horizonte de sucesos experimentará lo mismo que otro que se mueva por un vacío sin masas gravitatorias que lo atraigan pero con una aceleración igual a la que debe experimentar el primer observa-

dor para contrarrestar el campo gravitatorio y seguir junto al horizonte y no caer hacia él. Dado que el observador acelerado en el vacío sin gravedad verá que este emite radiación, también lo

Aunque los efectos de la creación de partículas puedan ser desdeñables localmente, mostraré en este artículo que a lo largo del tiempo de existencia del universo, del orden de 10^{17} segundos o 10^{60} unidades de tiempo de Planck, pueden acumularse hasta tener una influencia significativa en el agujero negro.

STEPHEN HAWKING

hará el observador que se encuentre parado junto al horizonte de sucesos. Por lo tanto, si se admite la realidad de la radiación de Unruh, los agujeros negros tienen que emitir radiación.

Hawking no dedujo que los agujeros negros tenían que emitir radiación con ese argumento. Fulling, Davies y Unruh llegaron a sus resultados, obtenidos más o menos a la vez que Hawking realizó su célebre cálculo, a partir del efecto que tenía la aceleración en un vacío cuántico sin gravedad, definido, pues, en el espacio-tiempo de Minkowski. Hawking calculó directa-

mente el efecto que el horizonte de sucesos de un agujero negro, un fenómeno gravitatorio, tenía en el vacío del espacio-tiempo de Schwarzschild, espacio-tiempo que tiende a ser igual al espacio-tiempo de Minkowski a muy grandes distancias (matemáticamente, en el infinito) del agujero, pero que difiere de él en su cercanía.

Para entender esto hay que tener en cuenta que el vacío es un elemento activo de la teoría cuántica de campos. Es el estado básico de los campos cuantizados, no una mera nada. Las partículas son excitaciones de ese estado básico, estados que añaden cuantos de energía a la energía del vacío (que, en general, salvo para determinados efectos, no es observable).

Pero, si nada puede salir del agujero, ¿cómo puede estar asociada la emisión de radiación así calculada a una pérdida de masa del agujero?

Hawking dedujo, junto con la existencia de la radiación que lleva su nombre, que el agujero absorbía al mismo tiempo un flujo de energía negativa, que disminuía la masa del agujero (aunque esa merma puede contrarrestarse con otros inlfujos, como

veremos). Dio además, pero no formaba parte de su cálculo, una posible explicación física de tal flujo negativo, aunque él mismo dijo que no debía tomarse al pie de la letra. Justo fuera del horizonte de sucesos se podían crear pares de partículas virtuales —excitaciones no observables del campo cuántico— de forma que una de ellas atravesase el horizonte de sucesos. La otra se convertiría así en una partícula ordinaria, observable, que podría escapar hacia el infinito. La que atraviesa el horizonte tendría en cambio energía negativa, es decir, equivaldría a una eliminación de masa en el agujero, desde el punto de vista del infinito, es decir, refiriéndola al comportamiento de los relojes muy lejos del agujero en vez de en sus inmediaciones (dentro del agujero, por el peculiar intercambio de papeles entre tiempo y espacio que se produce allí y del que ya hemos hablado, sería una partícula corriente).

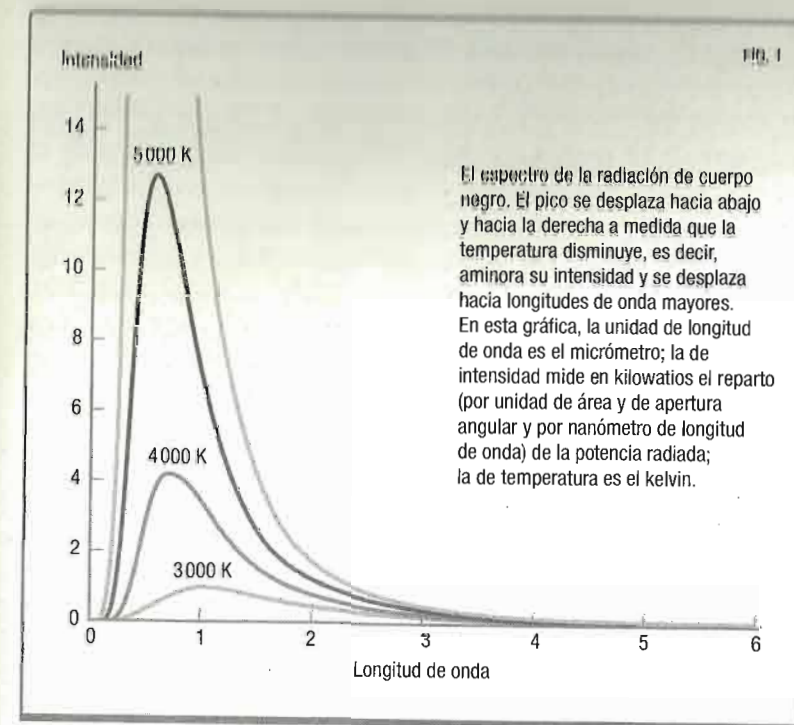
RADIACIÓN Y TEMPERATURA

De todo lo anterior, Hawking dedujo que con la evaporación de los agujeros negros se perdía información en el universo. Para entender por qué, un elemento clave es el concepto de *radiación de cuerpo negro*. Imaginemos un cuerpo que no refleja luz alguna: ¿qué espectro de frecuencias podemos esperar que emita? Cabría pensar que, si se trata de un objeto completamente negro, no tendría que generar radiación alguna. Sin embargo, eso no sería correcto: todo cuerpo emite radiación electromagnética debido al movimiento de sus partículas. Las partículas que componen átomos y moléculas tienen carga eléctrica, lo que significa que, cuando cambia su movimiento por las interacciones con otras partículas también en movimiento térmico, emiten ondas electromagnéticas. Si su energía es suficiente, entran en el espectro visible y podemos verlas. Esa es la razón por la que el hierro muy caliente empieza a brillar en la oscuridad. Sin embargo, en la mayoría de situaciones cotidianas esa radiación está mayoritariamente en el infrarrojo: no podemos observarla a no ser que usemos un equipo especial.

Un cuerpo negro emite radiación con un espectro particular. Hay una frecuencia en que la emisión es máxima para una temperatura dada; la radiación emitida se aproxima a cero cuanto más nos alejamos de esta en cualquier dirección, como se puede apreciar en la figura 1. Si sabemos dónde se encuentra el pico de radiación, podemos deducir la temperatura del cuerpo. En general, cuanto más a la izquierda se encuentre, mayor será la temperatura.

Hawking calculó que la radiación que emitía un agujero negro era como la radiación de un cuerpo negro, con una temperatura inversamente proporcional a su masa: cuanto mayor la masa, menor la temperatura. En general, estamos hablando de temperaturas muy frías: incluso un agujero negro del tamaño de la Tierra tendría una temperatura inferior a la de la radiación que llena el espacio vacío procedente del origen del universo, la radiación cósmica de fondo. Por lo tanto, para un agujero negro procedente del colapso de una estrella, o para cualquier agujero que haya llegado a adquirir una masa mucho mayor que la de una sola estrella, como los que hay en el centro de las galaxias, la temperatura del agujero será mucho menor que la de la radiación externa en que se baña: el agujero, pues, absorberá más radiación de la que emite y aumentará su masa (aparte de la que pueda ganar astrofísicamente al absorber otros cuerpos celestes o masas de gas), por la equivalencia einsteiniana entre masa y energía. Pero tras periodos de tiempo larguísimos, la temperatura del universo será menor que la de esos agujeros, que entonces empezarán a emitir más radiación de la que reciben, y por lo tanto empezarán a perder masa. Aumentará así su temperatura y el proceso finalmente se desbocará: el agujero se evaporará por completo.

Debe tenerse en cuenta que esa frialdad de los agujeros negros, y por lo tanto escasa energía de su radiación, se refiere a la medida por observadores muy lejanos al agujero, que no perciben ya el campo gravitatorio de este. Como toda radiación procedente de las inmediaciones del agujero, les llega con un gran desplazamiento hacia el rojo. Un observador estacionado muy cerca del horizonte de sucesos, en cambio, percibirá una radiación mucho más energética, que tiende a ser infinitamente elevada cuanto más cerca esté del horizonte.



Que el espectro de frecuencias de la radiación de cuerpo negro sea predecible se debe simplemente a que sigue las leyes de la probabilidad, y por lo tanto, en sus características generales, no dice nada acerca de los sistemas físicos que la generan. En ese sentido es una radiación de alta entropía. Sin embargo, los procesos microscópicos que la producen se atienen a las leyes de la mecánica cuántica, esa *unitariedad* que, como veíamos en el capítulo pasado, garantiza la predecibilidad, en el sentido en que esta es posible en mecánica cuántica. Eso se debe a que la radiación ordinaria, microscópicamente, está ligada a aquello que la emite. En cambio, la radiación de Hawking no guarda relación alguna con la materia o la radiación que se pierden dentro del agujero. Sea lo que sea dentro del agujero de la información contenida en esos sistemas físicos, cuando el agujero se evapore, si realmente no queda ningún residuo, solo subsistirá esa radiación

que no tiene nada que ver con ella. Será una radiación realmente aleatoria.

¿ADÓNDE VA LA INFORMACIÓN?

La conclusión que planteaba Hawking era inaceptable para Susskind y Gerardus 't Hooft, que consideraban que la conservación de la información era un principio demasiado importante como para no cumplirse. Recordemos que, si la información no se conserva, el universo deja de ser predecible: esto pone en aprieto a toda la física, sin restringirse al comportamiento de los agujeros negros.

Dado que las afirmaciones de Hawking tenían consecuencias nada bienvenidas, distintos físicos propusieron soluciones a lo que, consideraban, tenía que ser una conclusión errónea. Una posible solución era que la información se conservaba dentro de la singularidad. Según la teoría de Hawking un agujero negro se evapora a un ritmo cada vez mayor a medida que su tamaño decrece. De hecho, la temperatura de la superficie del agujero es inversamente proporcional a su masa. Por lo tanto, hacia el final de su vida el agujero negro tendría que tener una temperatura enorme, tanto que daría lugar a partículas a las que no tenemos acceso con nuestros aceleradores. Es posible que, a esa escala energética, nuestras teorías dejen de valer y que ocurra algo que conserve la información dentro de la singularidad. En este caso, tendríamos un objeto infinitamente denso con una gran cantidad de información, igual a toda la que cayó en el agujero negro durante su existencia.

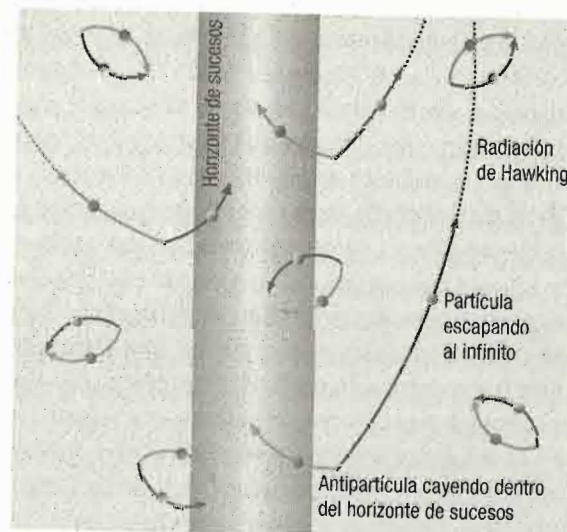
Este enfoque tiene varios problemas. Por un lado, la masa del residuo tendría que ser mucho menor que la del agujero negro en su inicio, ya que mucha de la energía habría escapado ya en forma de radiación de Hawking. Si la masa es menor, también tendrá que serlo la cantidad de información que encierra, con lo cual seguimos teniendo el mismo problema: parte de la información se ha perdido. Una posible salida es afirmar que el residuo tiene que contener toda la masa que ha caído en el agujero a lo largo de su existencia; en este caso, tendrá que explicar por qué la energía no

¿CUÁNTO TARDA EN EVAPORARSE UN AGUJERO NEGRO?

Dado que un agujero negro emite energía, tarde o temprano tendría que evaporarse por completo hasta desaparecer (véase la figura). En el universo actual esto es imposible de observar, porque la temperatura de los agujeros negros que conocemos está muy por debajo de la del fondo cósmico de microondas; así todos ellos engullen mucha más energía de la que emiten. Sin embargo, en un futuro lejano, cuando el universo se haya enfriado lo suficiente, los agujeros negros que no estén rodeados de materia sí empezarán a encogerse. Se puede calcular cuánto tarda un agujero negro en evaporarse a partir de suponer, en primer lugar, que emite radiación como un cuerpo negro. En segundo lugar, hay que tener en cuenta que la expansión del universo va enfriando su radiación cósmica de fondo, con lo que su temperatura acabará siendo inferior a la del agujero. A partir de ahí, es posible cuantificar cuánta energía pierde el agujero negro por segundo y llegar a una estimación de su tiempo de evaporación:

$$t_{ev} = \frac{5120 \pi G^2 M_0^3}{h c^4}$$

donde h es la constante reducida de Planck, que es la constante de Planck dividida por 2π . Para hacernos una idea de lo que tarda un agujero negro en evaporarse, podemos fijarnos en uno de una masa solar. En este caso, el tiempo de evaporación es de $5,617 \cdot 10^{64}$ segundos, lo que es considerablemente mayor que la edad del universo. Sin embargo, agujeros negros lo suficientemente pequeños tendrían que poder evaporarse en un tiempo mucho menor.



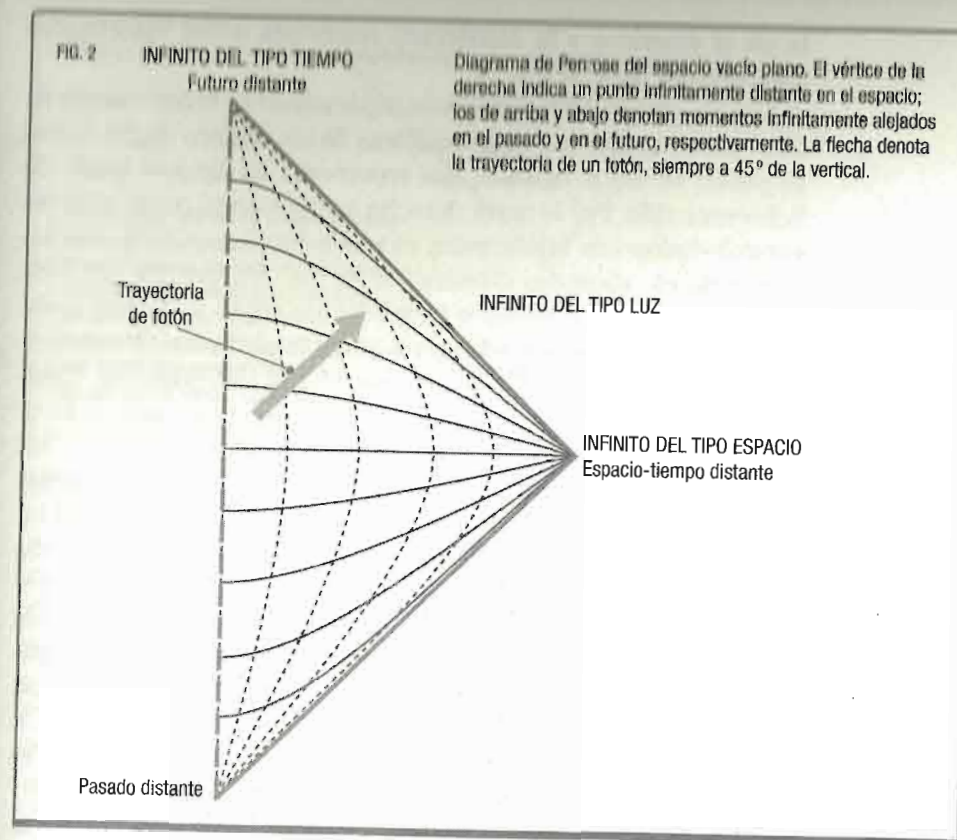
El cálculo de la creación de partículas en las inmediaciones de un agujero negro por Stephen Hawking predecía que a la vez había un flujo de energía negativa hacia el agujero, es decir, una disminución de la masa de este. Un posible mecanismo para este efecto es la creación de pares de partículas virtuales en el vacío de tal forma que adquieran realidad permanente al escapar una hacia el infinito y entrar la otra, con energía negativa para un observador exterior, en el agujero.

se conserva o, en otras palabras, de dónde ha sacado el agujero negro la energía necesaria para emitir la radiación de Hawking. En ambos casos, cae uno de los pilares de la física moderna: o bien la información no se conserva, o bien no lo hace la energía.

Otra teoría popular es la creación de universos-bebé. La propuesta, en este caso, es que la información no se pierde, sino que se usa para crear un nuevo universo que se expande, dando lugar a un Big Bang parecido al nuestro. Es una teoría en la que se basó Lee Smolin para proponer su selección natural de universos: según él, cada agujero negro da lugar a un universo-bebé. Los universos cuyas leyes los hagan propensos a crear más agujeros negros tendrán más descendencia, lo que crea un proceso de selección natural que acaba por producir universos ricos en agujeros negros, como el nuestro.

La teoría de los universos-bebé no es del todo descabellada y encuentra apoyo visual en una herramienta muy popular entre los físicos relativistas, llamada *diagrama de Penrose* o *diagrama de Penrose-Carter*. Estos diagramas son una representación esquemática del tipo de espacio-tiempo tratado en la que se han realizado ciertos aspectos para facilitar el análisis.

Los diagramas de Penrose son útiles porque representan el universo entero dentro de un diagrama finito. En la figura 2 se muestra un diagrama de Penrose del espacio-tiempo plano de Minkowski. Se suprimen dos dimensiones espaciales. Las líneas de posición y tiempo constante se transforman en curvas, como se ve en la gráfica: por ejemplo, todo evento que se halle en una de las curvas horizontales sucede simultáneamente; todo evento que se halle en una de las curvas verticales sucede en el mismo lugar. El vértice superior es donde el diagrama representa el futuro infinitamente distante de las geodésicas de tipo tiempo (es decir, de las que puede recorrer una partícula material); de la misma forma, el vértice derecho es donde el diagrama representa la prolongación hasta el infinito de las geodésicas de tipo espacio (es decir, las que no pueden ser recorridas por partículas materiales o por la luz, entre ellas las líneas de simultaneidad dibujadas en la figura como curvas sólidas). El lado superior derecho y el inferior izquierdo representan respectivamente el futuro y el pasado infi-



nitamente distante de las geodésicas de tipo luz (es decir, de las trayectorias espacio-temporales de la luz; las partículas materiales aceleradas también pueden tener esos infinitos). La línea de puntos de la derecha es un eje de simetría rotacional: cada punto interior del diagrama corresponde a una esfera bidimensional que comprende todos los puntos del espacio tridimensional que distan un mismo radio del centro de coordenadas.

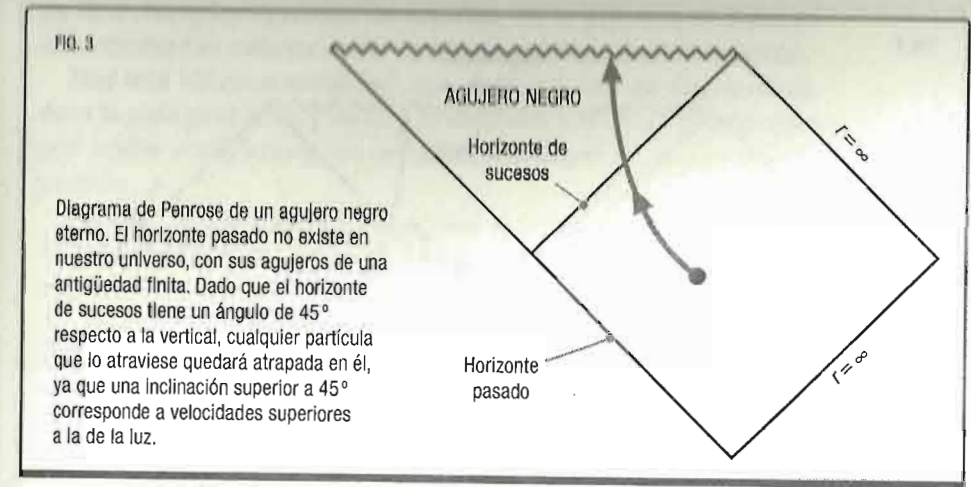
En un diagrama de Penrose, cualquier partícula que viaje a la velocidad de la luz se muestra como una línea recta que subtiende un ángulo de 45° con la vertical. Dado que ninguna partícula se puede mover más rápido que la luz, ningún objeto puede trazar una curva con un ángulo mayor que 45° . Esto es el equivalen-

te en el diagrama a la restricción relativista sobre velocidades mayores que la de la luz.

Los diagramas de Penrose son especialmente útiles cuando se usan para mostrar las características de un agujero negro, como se puede ver en la figura 3, que representa un agujero negro de Schwarzschild. Por la parte derecha acaba siendo como el de un espacio-tiempo de Minkowski; es por la parte izquierda del diagrama donde están las diferencias. Se pueden ver dos horizontes: el horizonte de sucesos propiamente dicho y el «horizonte pasado», que no es accesible para ninguna partícula. El horizonte propiamente dicho es el que conocemos normalmente como horizonte de sucesos: nos marca el punto de no retorno y es el único al que puede ir a parar una partícula material o rayo de luz que se mueva en nuestro universo. El lado inferior izquierdo del rombo no tiene sentido físico real: representa el pasado de un agujero negro eterno. Un horizonte de sucesos real ha existido solo durante un tiempo finito; en el diagrama se podría representar la creación del horizonte, por el colapso de una estrella, mediante una trayectoria dentro del rombo (el universo fuera del agujero negro) que atraviere el horizonte y que representará el desplome del astro sobre sí mismo; más allá de ella, por la izquierda del diagrama, quedaría suprimida toda la parte correspondiente al horizonte pasado.

La línea en zigzag de arriba nos muestra la singularidad. Es un solo punto espacial, pero en el interior del agujero negro ya sabemos que el espacio se comporta como el tiempo, de ahí que las curvas de radio constante sean en la parte del diagrama correspondiente al agujero «horizontales» en vez de «verticales».

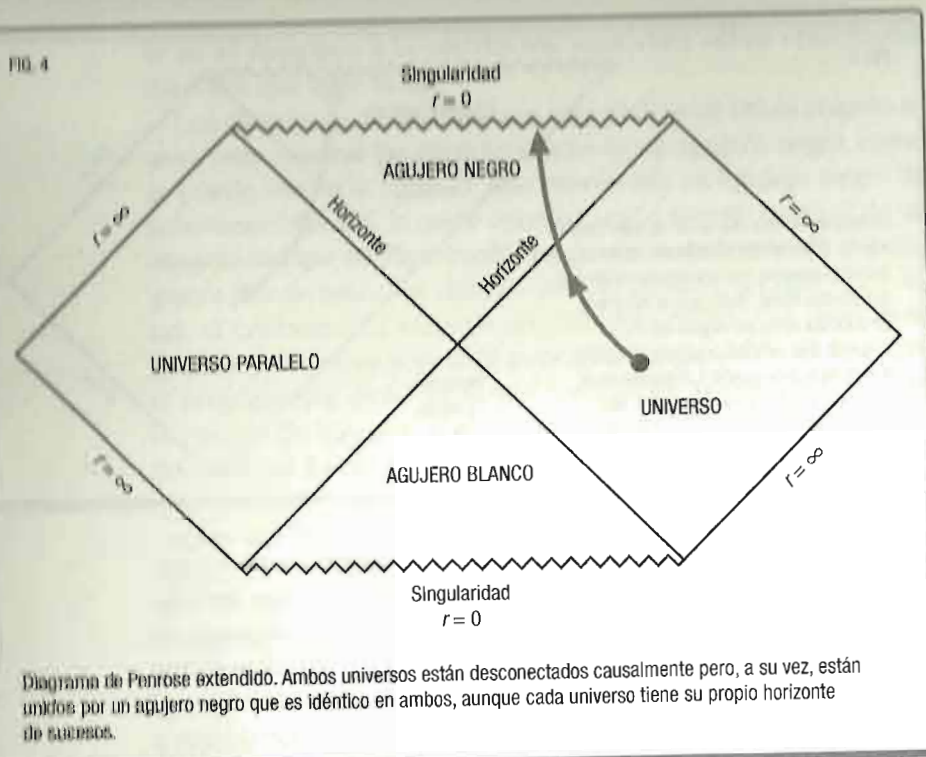
Fijémonos en una partícula que haya cruzado el horizonte de sucesos real: si quiere salir, tendrá que trazar una trayectoria que la lleve a cruzarlo de nuevo. Sin embargo, esa trayectoria subtiende un ángulo mayor de 45° con la vertical, lo que significa que es imposible. Cualquier objeto que cruce el horizonte de sucesos acabará, irremediamente, en la singularidad. Volviendo al argumento de Hawking, esto demuestra que es imposible que la información escape de un agujero negro, al menos según la relatividad general.



Se puede completar matemáticamente el diagrama de Penrose para obtener un objeto algo más simétrico. Se trata simplemente de un añadido matemático que hace todo el sistema un poco más elegante, pero nos da una idea sugerente sobre lo que podría pasar en una singularidad. Será también importante en el futuro a la hora de hablar de la relación entre agujeros negros y entrelazamiento cuántico, que empieza a ser considerada una de las piezas claves en el desarrollo del principio holográfico.

La nueva versión del diagrama de Penrose puede observarse en la figura 4. Tenemos dos singularidades: una se halla en el pasado y la otra en el futuro. Por otro lado, ahora hay dos espacio-tiempos, dos universos que se extienden hasta el infinito y tienden a ser allí planos.

En el agujero blanco no caerían partículas sin retorno; de él emergerían partículas que no podrían hacer otra cosa que emerger. Las dos regiones del diagrama que representan universos están causalmente separadas: no hay nada que podamos hacer en «nuestro» universo (eterno, recordemos, así que no es realmente nuestro universo) que pueda afectar al otro. Sin embargo, ambos mundos comparten el mismo agujero negro, la región rotulada así en el diagrama (se podría decir también que hay dos agujeros, uno en cada universo, en el sentido de que hay dos horizontes de



sucesos, pero que comparten un interior), y el mismo agujero blanco. A esa conexión se le llama «agujero de gusano». Trataremos esta cuestión más ampliamente en el último capítulo.

De lo anterior nace la idea de los universos-bebé: la posibilidad de que toda la información que se pierde en nuestro universo recalara en el otro, preservando así la conservación de la información.

Por desgracia, la idea de los universos-bebé no soluciona el problema. Aunque fuera cierta, seguiríamos con el mismo problema: la información se ha perdido en nuestro universo y ahora es absolutamente irrecuperable. Da igual que siga existiendo en otra parte: por lo que a nosotros respecta, la información se ha perdido. Nuestro universo ha dejado de ser determinista. Si, como posibilidad filosófica, la existencia de los universos-bebé

da una cierta tranquilidad de espíritu, en la práctica se trata de una opción tan nefasta como la simple pérdida de información.

Hay una última posibilidad, que es la que hoy en día se considera la más probable, y es que la información no se pierde, sino que acaba completamente revuelta, tanto que se vuelve irrecuperable.

La idea es parecida a lo que pasa si preparamos un tazón de leche con chocolate, donde la leche hace las veces de agujero negro y el chocolate de la materia que cae en él.

Cuando vertemos los polvos en la taza, están bien delimitados. Los podemos contar e incluso saber exactamente dónde están. Sin embargo, al añadirlos a la leche, el polvo empieza a esparcirse por toda la taza. Si esperamos lo suficiente y el chocolate es muy soluble, la leche acabará tiñéndose uniformemente de marrón, de forma que será imposible averiguar la posición de una partícula individual de chocolate.

Ignorando las leyes de la física, supongamos ahora que, si hervimos la leche, no solo el agua se evapora, sino que la leche y el chocolate se van con ella. A pesar de que será imposible recuperar información alguna del vapor, eso no significa que el chocolate se haya perdido, sino que se encuentra completamente disuelto en la leche. La información sigue ahí, pero esparcida de tal forma que resulta imposible de seguir.

A pesar de que es sugerente, hay un problema con esta imagen. En el caso de la taza, el chocolate tiene un lugar donde esparcirse: por la leche. En un agujero negro, la información tendría que haberse esparcido por el horizonte de sucesos. Pero eso parece imposible: la relatividad general nos dice que el horizonte de sucesos es indistinguible del vacío para cualquier observador que lo atravesase. Recordemos que el principio de equivalencia dice que cualquier región del espacio-tiempo es localmente plana: dado que toda la materia de un agujero negro se encuentra en la singularidad, el horizonte de sucesos es solo espacio vacío. Un observador que pase a través de él lo verá como si fuera una región plana del espacio, sin nada.

¿Dónde está la información, entonces? ¿Cómo es posible que se halle esparcida por el horizonte de sucesos, si en el horizonte

no hay nada? La respuesta a esta pregunta vino de la mano de Susskind y 't Hooft, que propusieron algo profundamente anti-intuitivo: un agujero negro tiene un aspecto distinto dependiendo de quién lo mire.

EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD

La idea de que un observador modifica lo que ve es antigua, pero profundamente confusa. En la mecánica cuántica, realizar una medida afecta al sistema estudiado, causando el colapso de la función de onda, es decir, al realizar una medida solo nos quedamos con uno de los resultados posibles, los demás desaparecen. En la teoría de la relatividad especial, dos observadores moviéndose a velocidades distintas verán pasar el tiempo a diferentes ritmos. Sin embargo, Susskind y 't Hooft propusieron algo mucho más radical: un agujero negro se comporta de forma completamente distinta para un observador que lo vea desde fuera y para otro que cae a través de su horizonte de sucesos.

Empecemos primero por el observador que cae. En este caso, el principio de equivalencia nos dice que, al cruzar el horizonte de sucesos, no debería observar nada especial. En su lugar, seguirá cayendo hacia la singularidad, experimentando fuerzas de marea cada vez más intensas. Las fuerzas de marea se producen porque la intensidad de la gravedad aumenta al acercarnos a su fuente: por lo tanto, si caemos de pie, nuestros pies se verán más atraídos que nuestra cabeza. Debido a esa diferencia en fuerzas, notaremos como si algo nos estirase verticalmente. En la Tierra las fuerzas de marea son despreciables, pero en un agujero negro se vuelven tan intensas que acaban por desmembrar a cualquiera que caiga en ellos: de hecho, cada partícula individual se verá alargada infinitamente antes de caer en la singularidad.

Para un observador que cae, la información se halla dentro del horizonte de sucesos, o bien cayendo hacia la singularidad, o bien ya en ella.

Veamos ahora la situación desde la perspectiva de alguien que se halla fuera del agujero negro. Supongamos que ese alguien

deja caer una linterna, que emite pulsos de luz hacia fuera a un ritmo constante. A medida que la linterna se acerque al horizonte de sucesos, sus pulsos irán llegando con cada vez menos frecuencia, debido a la dilatación temporal cerca del horizonte de sucesos. Poco antes de cruzarlo, los pulsos prácticamente se detendrán, para parar por completo en la frontera.

La interpretación de este hecho es sencilla: para un observador externo, la linterna nunca llega a cruzar el horizonte de sucesos, sino que queda justo en este, congelada para siempre. Dado que el tiempo está infinitamente dilatado en el horizonte de sucesos, se necesita una cantidad infinita de tiempo para cruzarlo. Así pues, nada de lo que llega al horizonte de sucesos llega a cruzarlo. Toda la materia que ha caído en el agujero negro se encuentra aún ahí, esperando para siempre a traspasar el horizonte para entrar en la singularidad.

Esto puede parecer contradictorio. ¿No habíamos quedado en que un observador que caiga por el agujero negro lo cruzará sin notar nada y llegará a la singularidad? ¿Cómo se concilia esto con el hecho de que se necesita un tiempo infinito para ello? No puede ser que las dos imágenes sean correctas: o bien lo es una, o bien lo es la otra.

Sin embargo, no hay contradicción alguna. La física no habla de qué pasa realmente en el universo, sino de resultados de experimentos. Es decir: la física nos dice qué resultados experimentales obtendrá alguien si realiza ciertas acciones, nada más. En este caso, no hay ningún experimento posible que pueda realizarse que dé lugar a una contradicción. El observador que ha caído por el agujero nunca podrá comunicar al de fuera el resultado de sus observaciones, con lo cual una contradicción es imposible. La imagen dual del agujero negro es perfectamente consistente, aunque algo confusa.

Nos queda ahora ver cómo da cuenta esta nueva imagen de que la información recale en el horizonte de sucesos. De momento, hemos visto que un cuerpo acabará congelado antes de atravesarlo, pero no está nada claro que tenga que disolverse en él. Más bien, debería quedar atrapado en la posición que ocupaba justo antes de pasar por el horizonte.

Sin embargo, nos olvidamos de que, según el observador externo, en el horizonte debe de haber una cantidad enorme de materia concentrada en una superficie minúscula. En otras palabras: el horizonte está lleno de materia, antes incluso de que nuestra linterna caiga por él. Además, esa materia está increíblemente comprimida. Tenemos muchísima masa en muy poco espacio.

Pero, según Einstein, masa y energía son una misma cosa (en el sentido, como hemos visto antes, de que son formas distintas de una misma magnitud física, la masa-energía). Así pues, lo que tenemos en realidad es muchísima energía en muy poco espacio: en particular, en el horizonte *estirado*, una capa de un grosor comparable a la longitud de Planck alrededor del horizonte de sucesos. Esta enorme densidad de energía significa, al menos desde la perspectiva de un observador externo, que el horizonte está increíblemente caliente.

En un gas caliente, las moléculas se mueven a gran velocidad: por eso, si ponemos otro cuerpo dentro, acabará también por calentarse, ya que sus partículas recibirán el impacto de las del gas, lo que hará que acaben por ganar una energía comparable a la de las partículas del gas donde se encuentran. A suficiente temperatura, las moléculas mismas acaban por romperse y dar lugar a electrones y núcleos atómicos moviéndose por separado a gran velocidad: en este caso, decimos que nuestro gas se ha transformado en un *plasma*. Nuestro Sol, por ejemplo, es una gran esfera de plasma.

Si seguimos calentando el plasma, los núcleos atómicos se separarán en sus constituyentes fundamentales: primero, neutrones y protones; más tarde, los quarks y gluones de los que están hechos. Cualquier objeto que entre en un plasma a esa temperatura quedará vaporizado al instante: se convertirá en una parte más de ese plasma de partículas elementales.

El horizonte de sucesos estirado sería un lugar parecido. Dado que su densidad energética es enorme, tiene que tener una temperatura sumamente elevada, aunque no infinita, ya que no está en el horizonte, sino muy cerca de él, a una longitud de Planck. Pero un astronauta que se deje caer y atravesase el horizonte no percibirá nada de ello, no se vaporizará bombardeado por partículas tan ca-

lientes. Eso sí, como la caída le llevaría inmediatamente a atravesar el horizonte de sucesos, solo le esperaría allí la singularidad.

¿Por qué se quedan las partículas en el horizonte de sucesos?

Si se mueven a esas velocidades, ¿no tendrían que desplazarse en tres dimensiones? ¿No saldrían disparadas hacia, o bien la singularidad, o bien el exterior del agujero negro? Por suerte, la gravedad del agujero negro se encarga de que ninguno de los dos casos pueda darse. La radiación de Hawking se reinterpreta como una emisión desde ese gas caliente, pero su flujo, argumentaba Susskind, es menor que el correspondiente al gas ultracaliente del horizonte estirado. Dedujo que la fuerza de la gravedad volvía a atraer hacia el horizonte extendido a la mayoría de las partículas emitidas desde este. Por otro lado, según un observador lejano las partículas no pueden caer hacia la singularidad debido a la dilatación temporal: dado que el tiempo parece congelado, les llevaría un tiempo infinito cruzar el horizonte de sucesos.

Esta visión dual es lo que Susskind bautizó como el principio de complementariedad, que afirma que ambas visiones del agujero son correctas y describen aspectos complementarios de su comportamiento. Todas las cantidades físicamente relevantes pueden describirse en cualquiera de las dos imágenes; ningún experimento posible puede discernir entre ellas. Los dos observadores tienen razón: por un lado, todo lo que cae en el agujero negro acaba en la singularidad; por otro, nada llega jamás a la singularidad, dado que queda atrapado en el horizonte de sucesos. El horizonte de sucesos es una región del espacio sin nada especial, exactamente igual que el espacio vacío para ciertos observadores; para otros, contiene un plasma extremadamente caliente que vaporiza cualquier elemento que trate de cruzarlo. No son descripciones contradictorias, sino complementarias. Todo depende del observador.

Cada vez que un bit de información se borra, sabemos que no desaparece. Se disipa en el exterior. Puede ser que esté completamente revuelto y confundido, pero nunca se pierde. Solo toma una forma distinta.

LEONARD SUSSKIND

Con esta situación el conocimiento perfecto del pasado aún permitiría predecir el futuro posterior a la evaporación del agujero, aunque solo fuese en principio. La radiación emitida por el agujero ya no estaría completamente desvinculada de la materia y la luz que cayese en el agujero. Al contrario, dependería de esa información, en la forma que adquiriese en el horizonte estirado. Pero esa dependencia sería como la dependencia con respecto al estado de un trozo de carbón de la ceniza y la radiación que se desprendiesen al quemarlo. La información efectivamente disponible disminuiría con respecto a la contenida en los estados físicos del pasado lejano, antes de la creación del agujero, pero microscópicamente existiría una evolución determinista (recuérdese lo explicado en el capítulo anterior acerca del determinismo en la mecánica cuántica). En ese sentido es en el que se dice que el problema de la pérdida de información por la radiación de Hawking queda resuelto por los principios holográfico y de complementariedad.

El principio de complementariedad para agujeros negros tiene el mismo nombre que el principio de complementariedad de la mecánica cuántica, que afirma que algunos objetos tienen propiedades complementarias que no pueden medirse al mismo tiempo. Por ejemplo, la posición y el momento son cantidades complementarias en mecánica cuántica que dan descripciones alternativas del comportamiento de una partícula. Un científico puede medir con exactitud la posición o el momento, pero no ambos a la vez. El parecido no es casual: igual que en la mecánica cuántica, las dos visiones de un agujero negro son complementarias y excluyentes: o bien vemos el agujero desde fuera o desde dentro, pero no podemos hacerle las dos preguntas al mismo tiempo. El principio de complementariedad tiene un sabor cuántico y nos da la primera pista sobre cómo unificar esas dos teorías aparentemente tan distintas.

El principio holográfico

La paradoja de la información llevó a 't Hooft y, siguiéndole, a Susskind a proponer que la información contenida en un agujero negro se halla en su superficie. Este simple hecho tiene consecuencias enormes para nuestra comprensión del espacio y el tiempo, apuntando a la posibilidad de que ambos surjan de algo más fundamental.

El estudio de los agujeros negros parece desconectado de nuestro día a día: al fin y al cabo, ¿qué nos puede decir un fenómeno cósmico exótico sobre lo que sucede en la Tierra? Resulta que mucho. Durante décadas, los agujeros negros fueron solo una especie de subproducto de la relatividad general, rama de la física que, a su vez, parecía estar en un limbo. Ocupaban un lugar marginal en la física, sin nexo alguno con los desarrollos principales de esta. En cambio, desde finales de los años sesenta pasaron a ocupar, tendencia que se ha acentuado cada vez más, un lugar central en la descripción astrofísica del mundo y en los fundamentos mismos de la física. Hoy parecen los lugares donde podría esconderse el secreto de la unión de la mecánica cuántica y de la gravitación. Los principios básicos de la física están en juego: desde la segunda ley de la termodinámica hasta la conservación de la información.

El principio de complementariedad daba una posible salida a la paradoja de la información: esta no se perdía, ya que quedaba atrapada en la superficie del horizonte de sucesos. Hawking, en cambio, aseguraba que la información salía en forma de radiación térmica que no estaba correlacionada con la materia y

radiación caídas en el agujero, y por lo tanto no se conservaba. Susskind no estaba de acuerdo: según él, el resultado de Bekenstein era una prueba fehaciente de que la información tenía que hallarse en la superficie definida por el horizonte de sucesos.

INFORMACIÓN Y ÁREA

El descubrimiento de que la entropía de un agujero negro es proporcional a su área va mucho más allá de la termodinámica o la gravedad: redefine todo lo que sabemos acerca de la información.

¿Cómo almacenamos información? Hoy en día lo hacemos de muchas formas: por ejemplo, en libros. La idea es que codificamos la información en forma de letras y luego las escribimos en las páginas del volumen en cuestión. El advenimiento de la electrónica ha mejorado esta técnica drásticamente: hoy en día, la información se almacena en discos duros y otros dispositivos similares, en forma de bits que corresponden a distintas orientaciones de imanes microscópicos.

Nuestra habilidad para almacenar más y más información en espacios cada vez menores no parece tener límite. Cada año surge una nueva memoria con el doble de capacidad que las del año anterior. ¿Podemos seguir mejorando indefinidamente, o habrá un momento en el que las leyes de la física nos impidan ir más allá?

La única forma de incrementar nuestra capacidad de almacenamiento es reducir el tamaño de los bits. Cuanto menos ocupe un bit, más podremos meter en un espacio determinado. Así que nuestro problema principal es saber si existe un tamaño mínimo para los bits: si es así, nuestra capacidad de almacenar información estará limitada; si no, podremos siempre mejorar nuestra tecnología por el simple método de considerar bits cada vez más pequeños.

Para responder a todas estas cuestiones, es fundamental ser conscientes de que la información y la energía están íntimamente relacionadas. Los bits se materializan en entes físicos

y, como tales, tienen una cierta masa y, en consecuencia, una cierta energía.

Nuestra meta es almacenar la máxima información posible en una región limitada del espacio, lo que significa que tiene que estar todo lo apretujada que se pueda. En otras palabras, queremos meter tanta energía como sea posible en un cierto lugar. Uno podría pensar que, si comprimimos los bits suficientemente, podremos añadir tanta información como queramos, pero las leyes de la física nos lo impiden: en realidad, hay una cantidad máxima de energía que se puede meter en una región del espacio. Si ponemos demasiada energía en nuestro disco duro, este tendrá tanta que acabará por crear un agujero negro.

Se trata de un descubrimiento revelador: los agujeros negros no solo nos indican una región del espacio de donde ni siquiera la luz puede escapar, sino que nos dan también un límite superior a la información que puede almacenarse en esa región. Los agujeros negros contienen la cantidad máxima de información posible. A pesar de que solo necesitamos tres números para describirlos, los agujeros negros tienen la máxima entropía que se puede almacenar en una región del espacio.

Todavía hay más: la información contenida en un agujero negro no es proporcional a su volumen, sino a su área. Por consiguiente, la máxima información que puede contener una región del espacio es proporcional al área que la envuelve y no a su volumen.

Se trata de una conclusión completamente inesperada. Volviendo a nuestro disco duro, acabamos de descubrir que, en realidad, la máxima información que podríamos almacenar en él, o en cualquier medio de almacenamiento de información, fuera cual fuera el procedimiento, por extremas que llegasen a ser las densidades de información, sería proporcional a su área, no al volumen que ocupa. Parece un sinsentido: ¿de verdad podemos almacenar lo mismo con los bits de la superficie que con los de dentro? Es como si nos dijeran que basta con las paredes de una habitación para saber todo lo que se encuentra en su interior. Sin embargo, es una conclusión inevitable de la física de los agujeros negros.

Susskind llamó a este descubrimiento el *principio holográfico*: la información contenida en una cierta región del espacio está contenida en su superficie. Por ejemplo, nuestro universo entero se puede describir usando información contenida en su frontera. Susskind se basaba en los descubrimientos recientes sobre agujeros negros pero también en la teoría de cuerdas.

CUERDAS Y MEMBRANAS

La teoría de cuerdas es un firme candidato a superar el modelo estándar. Su premisa es que los componentes fundamentales del universo no son partículas, sino pequeñas cuerdas de longitud minúscula. Se trata de una vasta área de investigación, que está en continuo desarrollo. Sería imposible dar una visión general en pocas líneas: en lo que sigue se expondrán solo las características necesarias para entender sus aplicaciones al principio holográfico.

En la mecánica cuántica de campos las partículas no tienen volumen, sino que son infinitamente pequeñas. Esto ocasiona serios problemas matemáticos, porque dos cargas iguales infinitamente próximas se repelen con una fuerza infinita. Así pues, se necesitaría una fuerza infinita para evitar que el electrón se desintegrara y, por lo tanto, una energía infinita para crear uno. El problema se soluciona gracias a un proceso matemático llamado *renormalización*. Por desgracia, esto solo funciona en teorías sin gravedad: en gravedad, la renormalización no es posible y el problema del volumen nulo se vuelve acuciante. La energía, recordemos, es masa: una partícula con energía infinita tendrá también una masa infinita, lo que convertirá en infinita su atracción gravitatoria.

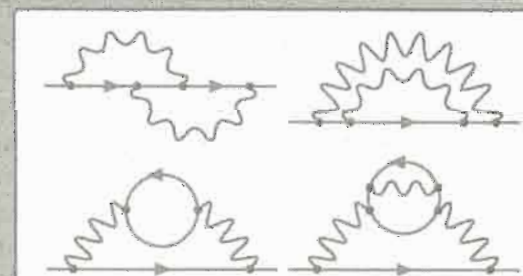
Una posible salida es dejar de suponer que las partículas son puntos. La teoría de cuerdas hace precisamente eso: trata a las partículas elementales como pequeñas cuerdas cuya longitud es aproximadamente igual a la longitud de Planck (figura 1). Las diferentes vibraciones de esas cuerdas dan lugar a las distintas partículas del modelo estándar, además de muchas otras que aún

LA RENORMALIZACIÓN

La renormalización es una técnica matemática que permite a los físicos eliminar o, al menos, distraer, los infinitos de una teoría cuántica de campos. En la mecánica cuántica todo lo que no está prohibido es obligatorio. Pongamos, por ejemplo, un electrón que se mueve de un punto a otro. Si queremos conocer la probabilidad de que eso suceda, tenemos que tener en cuenta no solo la trayectoria en línea recta, sino cada trayectoria posible. Cada una de ellas tiene una amplitud de probabilidad asociada, que disminuye a medida que nos alejamos de la línea recta. Hay muchas más posibilidades asociadas a la propagación de un electrón. Por ejemplo, el electrón podría emitir un fotón y luego absorberlo de nuevo. O bien podría emitir un fotón, luego otro, y luego absorber ambos. Otra posibilidad es que el fotón se desintegre en un par electrón-positrón, que más tarde se aniquilarán para volver a formar un fotón que, a su vez, es absorbido por el electrón inicial. Todas estas posibilidades tienen que ser tomadas en cuenta al hacer los cálculos y, en cierto sentido, se dan a la vez. Se suelen representar usando una herramienta llamada *diagrama de Feynman*, donde los electrones se muestran como líneas rectas, y los fotones, como líneas onduladas. Varios ejemplos se pueden ver en la figura.

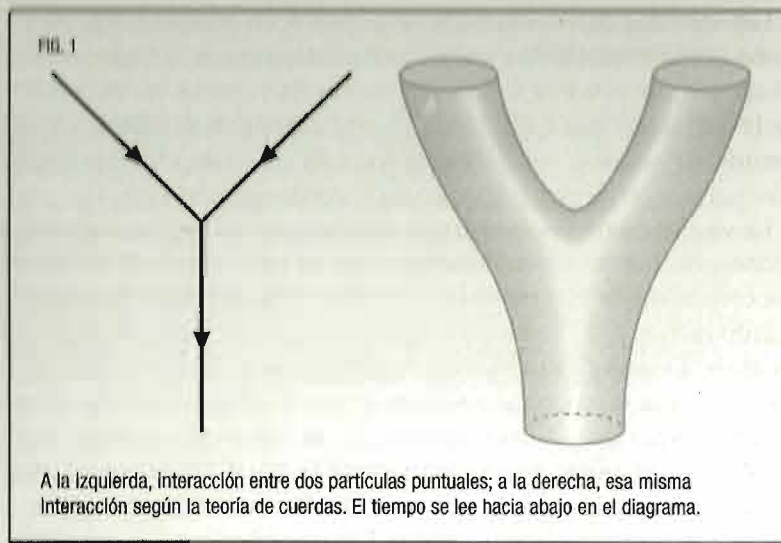
La autoenergía del electrón

Las posibilidades anteriores son un ejemplo de lo que los físicos llaman *autoenergía*, que significa que el electrón está interactuando consigo mismo, lo que hay que tener en cuenta si queremos realizar predicciones en nuestra teoría. El problema de estos diagramas es que dan lugar a infinitos, que luego hay que eliminar mediante el proceso de renormalización. Pongamos primero el caso del electrón que emite un fotón y luego lo reabsorbe. Parece que solo tengamos una posibilidad pero, en realidad, hay infinitas. Dado que tenemos que tener en cuenta todas las posibilidades, hay que incluir aquellas donde el tiempo entre emisión y absorción es arbitrariamente pequeño, lo que significa que la energía del fotón es arbitrariamente grande: esto nos lleva a lo que los físicos llaman una *divergencia*, es decir, un cálculo donde los valores se disparan hasta el infinito. La renormalización consiste en absorber esos infinitos en las constantes físicas. Pongamos, por ejemplo, la electrodinámica cuántica: en este caso, la teoría está determinada por



Distintas posibilidades para la autoenergía del electrón.

cantidades como la masa y la carga del electrón. Sin embargo, los valores que introducimos en las ecuaciones no son los que medimos: debido a la autointeracción del electrón, su masa y carga reales son inobservables. Si calculamos los valores observados, obtenemos infinito como resultado. La renormalización realiza algo similar a un cambio de escala de forma que los valores observados coincidan con los calculados.



no han sido observadas. Debido a que las cuerdas tienen una cierta longitud, sus problemas con los infinitos no son los de la mecánica cuántica de campos. Además, en las teorías de cuerdas surge de forma natural la interacción gravitatoria, sin tener que añadirla a mano, mientras que en la mecánica cuántica de campos la introducción de la gravedad tiene efectos catastróficos.

Las cuerdas de la teoría suelen llamarse *cuerdas fundamentales*, para distinguirlas de otros objetos similares presentes en otros ámbitos. Hay dos tipos de cuerdas: por un lado, las *cuerdas cerradas*, que son pequeños aros. Las cuerdas cerradas se hallan en todas las versiones de la teoría de cuerdas e incluyen al gravitón, la hipotética partícula encargada de transmitir la fuerza gravitatoria. Por otro lado, existen las cuerdas abiertas, cuyos extremos no se tocan. Se encuentran en algunas versiones de la teoría, pero no en todas.

Además de oscilar, las cuerdas pueden interactuar entre sí o consigo mismas, separándose en pedazos o uniéndose con otras cuerdas. Esto es lo que da lugar a las distintas interacciones de la teoría y desempeña un papel análogo a la emisión y absorción de partículas en la mecánica cuántica de campos.

Las cuerdas fundamentales se parecen en muchos aspectos a una goma elástica. Como las gomas elásticas, son capaces de vibrar y rotar sobre sí mismas, y su energía (su masa) depende de la forma en que lo hagan. Sin embargo, son distintas en el sentido de que son pegajosas en toda su extensión: pueden engancharse a otras cuerdas o, como veremos, superficies.

La vibración de las cuerdas modifica su longitud, lo que tiene consecuencias muy interesantes para el principio holográfico. Recordemos que el principio de indeterminación nos dice que, cuanto menos indeterminada está la posición, más lo está el momento y viceversa. Otra forma del principio dice, de forma similar, que cuanto más resolución temporal tenga nuestra medida, más incertidumbre tendrá la energía de la partícula que medimos. La resolución temporal puede imaginarse como si tuviésemos una cámara de alta velocidad: cuantos más fotogramas por segundo grabemos, más resolución temporal tendremos, porque seremos capaces de ver detalles muy finos en el movimiento si después los proyectamos más despacio. Para aumentar nuestra resolución temporal tenemos, pues, que grabar fotogramas más breves.

En el caso de una cuerda fundamental, esto tiene un efecto profundamente anti-intuitivo. Si observamos una cuerda a baja resolución temporal, su energía estará bien determinada, las formas de vibrar de la cuerda estarán limitadas y la longitud de la cuerda no cambiará mucho. Sin embargo, ¿qué pasa si aumentamos la resolución temporal? En este caso, la indeterminación en la energía aumenta, hay más vibraciones y la cuerda puede alargarse más. Si es tan fácil aumentar el tamaño de una cuerda, ¿por qué no lo hacemos? ¿No confirmaría esto la teoría de cuerdas? La respuesta es que aumentar la resolución temporal requiere energía. Para observar algo necesitamos verlo, es decir, hacer que reboten fotones contra ello. La resolución temporal depende de las frecuencias de esos fotones: a más frecuencia, más resolución. Por desgracia, la frecuencia de los fotones también depende de su energía. Es decir, si queremos un fotón con la frecuencia necesaria, debemos darle mucha energía.

En los aceleradores de partículas usamos otras partículas, como protones o electrones. El más poderoso de todos, el LHC

de Ginebra, emplea una combinación de imanes y generadores eléctricos para dar energías enormes a las partículas que usa como sondas. Lamentablemente, la energía que necesitaríamos para lograr ver una cuerda fundamental es enorme: tanto, que tendríamos que construir un acelerador de partículas del tamaño de la galaxia para lograrlo.

Sin embargo, hay una forma de aumentar la resolución temporal de forma drástica sin necesidad de un acelerador de partículas: enviar a nuestra cuerda fundamental a un agujero negro. Recordemos que cuanto más cerca se está del horizonte de sucesos el tiempo cada vez pasa más lento, tal como lo ve un observador externo, hasta detenerse en la frontera. Si dejamos caer una cuerda hacia el horizonte de sucesos, oscilaciones que antes parecían invisibles debido a su gran rapidez pasarán a ser visibles, ya que el tiempo transcurre más lento. Será parecido a observar un movimiento a cámara lenta que no registrábamos con el ojo desnudo. Y a medida que aumenta la resolución temporal, la cuerda crece.

Finalmente, la cuerda ocupa todo el horizonte, de forma que toda la información que contiene se esparce por él.

Este modelo fue utilizado por Susskind para realizar un cálculo preliminar de la entropía de un agujero negro usando la teoría de cuerdas. Susskind tomó una cuerda fundamental y la alargó hasta que ocupase un cierto volumen. Luego calculó su entropía, ignorando por el momento la gravedad. Finalmente, añadió la gravedad a sus cálculos, comprobando que la cuerda quedaba hecha un ovillo, cuya área externa era proporcional a la entropía de la cuerda. A pesar de que se trataba solo de un cálculo preliminar, fue una indicación de que la teoría de cuerdas podía solucionar la paradoja de la información.

Otra característica que diferencia a la teoría de cuerdas de otras rivales es que predice la existencia de dimensiones extra en el espacio. En lugar de las tres a las que estamos acostumbrados, la teoría de cuerdas tiene nueve, más una de tiempo.

Es por supuesto imposible imaginar más de tres dimensiones espaciales. Sin embargo, matemáticamente no tiene ningún secreto. En tres dimensiones necesitamos tres números para especificar la posición de un objeto, uno para cada dirección en

MICROAGUJEROS NEGROS Y DIMENSIONES EXTRA

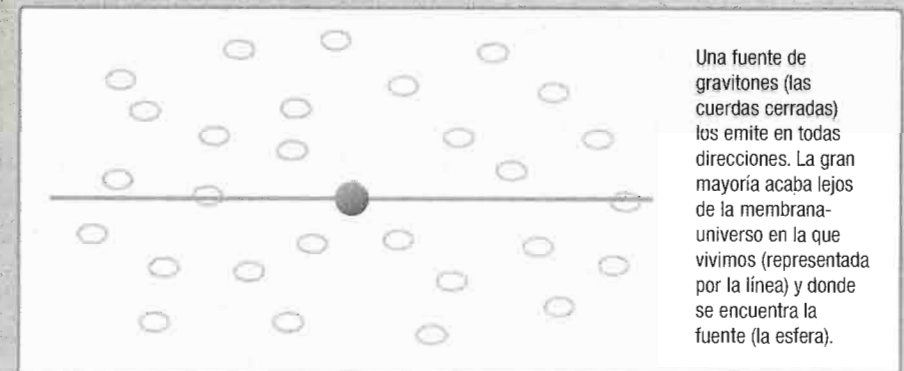
A pesar de que la teoría de cuerdas es notablemente difícil de poner a prueba experimentalmente, existen algunas posibilidades de que puedan ser observadas, ya sea en el acelerador de partículas LHC o en observaciones cosmológicas. Una de esas posibilidades es la creación de microagujeros negros en el LHC.

Escapes de gravedad

La fuerza de la gravedad es mucho más débil que cualquiera de las otras tres fuerzas fundamentales. La diferencia es tan pronunciada que muchos físicos creen que es un hecho que necesita una explicación. Hay varias propuestas sobre por qué la gravedad es tan débil: una de ellas afirma que, en realidad, se trata de una fuerza como las otras pero que, dado que los gravitones son cuerdas cerradas, no se pegan a las branas. Si nuestro universo resultara ser una 4-brana insertada en un espacio de mayor dimensionalidad, la mayoría de los gravitones escaparían a las dimensiones extra. Una fuente de gravitones los emitiría en todas direcciones en un espacio de múltiples dimensiones. Solo una fracción ínfima de ellos se propagaría por la membrana tridimensional que sería nuestro universo, inserta en un espacio de más dimensiones.

Agujeros negros en el LHC

Si las dimensiones adicionales son suficientemente grandes, a las energías que el LHC llegará a alcanzar de hasta 14 teraelectronvoltios se podrían ya detectar los efectos de esas dimensiones, es decir, una intensificación de la gravedad a las distancias correspondientes. Pero entonces podría crearse un microagujero negro en el acelerador. Por supuesto, no hay que preocuparse: un microagujero negro se desintegrará de inmediato, emitiendo radiación de Hawking. No existe riesgo alguno para la humanidad. Y de momento, los resultados experimentales no confirman los modelos que predicen la creación de microagujeros negros en el LHC.



Una fuente de gravitones (las cuerdas cerradas) los emite en todas direcciones. La gran mayoría acaba lejos de la membrana-universo en la que vivimos (representada por la línea) y donde se encuentra la fuente (la esfera).

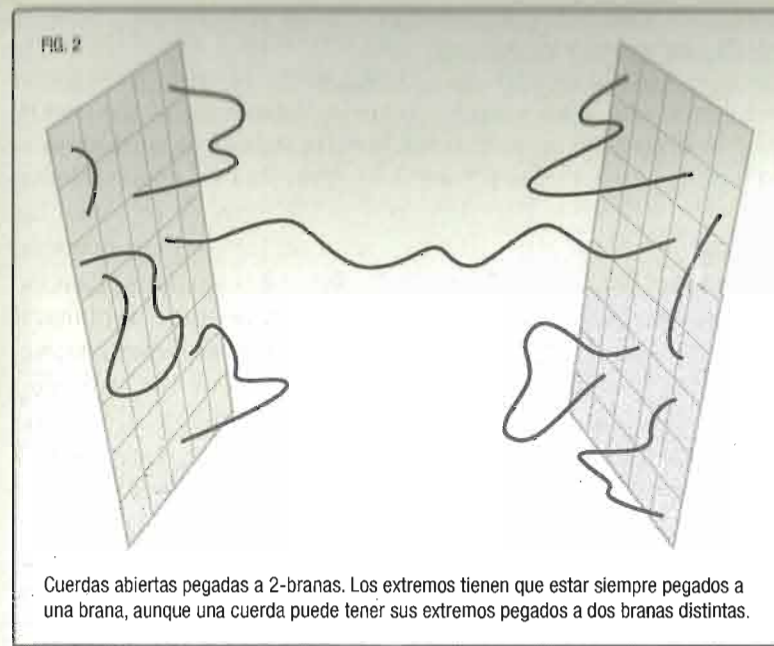
la que puede encontrarse. Si queremos añadir una dimensión, solo tenemos que añadir un número más. De esta forma podemos operar con espacios que tengan la dimensión que queramos.

La introducción de dimensiones extra parece un problema: si existen, ¿por qué no las vemos? La respuesta está en algo llamado *compactificación*. La compactificación consiste en tomar las dimensiones extra y contraerlas hasta un tamaño tan pequeño que sean inobservables. Se trata de algo parecido a mirar un cable desde lejos y desde cerca. Desde cerca, se trata claramente de un objeto bidimensional, considerando solo su superficie: tiene una cierta extensión, pero también un grosor. Sin embargo, mirándolo desde lejos el grosor es inapreciable, de forma que el cable parece solo una línea. Las dimensiones extra, como en el caso del cable, solo tienen efectos perceptibles a resoluciones mucho mayores de las que utilizamos en nuestro día a día.

A pesar de los progresos que había hecho la teoría de cuerdas para poner en pie más firme al principio holográfico, aún no era posible construir un agujero negro cuerdístico que reprodujera todas las características predichas por Hawking. En particular, nadie había sido capaz de reproducir su fórmula para la entropía y la temperatura, al menos no con todos los factores numéricos relevantes. Había sido posible demostrar relaciones de proporcionalidad, pero un cálculo completo seguía ausente. El ingrediente que faltaba era un nuevo objeto cuerdístico descubierto por Joseph Polchinski (nacido en 1954), al que bautizó con el nombre de *D-brana*.

Las D-branas son una extensión del concepto de membrana. Las membranas de nuestra cotidianidad tienen dos dimensiones, como una sábana; las D-branas de la teoría de cuerdas pueden tener un número cualquiera de dimensiones. Una D0-brana es un punto; una D1-brana es una línea. Las D2-branas son parecidas a las membranas de toda la vida. Una D3-brana ocupa un volumen de espacio, como un cubo gelatinoso.

Una D-brana es un objeto dinámico de la teoría: como una partícula, puede tener energía y carga. Debido a eso, interactúa con las demás cuerdas. De hecho, la característica más importante de las D-branas, por lo que respecta al principio holográfico, es



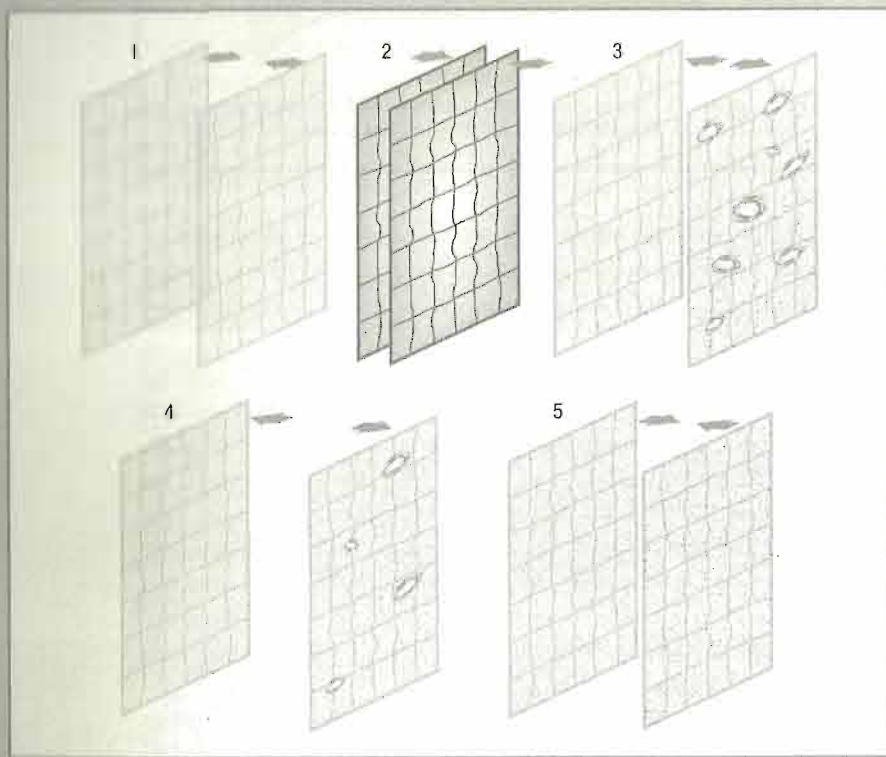
que las cuerdas abiertas están obligadas a acabar en una de ellas. Por ejemplo, una cuerda abierta puede tener dos extremos pegados a una 2-brana, como se muestra en la figura 2 (obviaremos la D en adelante).

Algunos físicos han conjeturado que la razón por la que no vemos las dimensiones extra es que nuestro universo es una 3-brana en la que están pegadas todas las partículas del modelo estándar, menos el gravitón que, al ser una cuerda cerrada, no tiene extremos que puedan engancharse a nada. Así pues, tendríamos la sensación de estar en un universo tridimensional porque nuestras partículas están confinadas a una D-brana con esa dimensión; por otro lado, la fuerza gravitatoria sería tan débil porque la mayoría de los gravitones escapan a las dimensiones extra, ya que no están pegados a la 3-brana.

Las D-branas pueden usarse conjuntamente para crear sistemas que se parecen mucho a los de la mecánica cuántica de campos. Empezaremos por un ejemplo sencillo, como el electromag-

EL UNIVERSO CÍCLICO DE TUROK Y STEINHARDT

La introducción de las branas en la teoría de cuerdas ha llevado a la creación de un modelo cosmológico en competición con la teoría inflacionaria, la más aceptada hoy en día para la evolución del universo en sus primeros estadios. Neil Turok (n. 1958) y Paul Steinhardt (n. 1952) propusieron en 2001 que el Big Bang es en realidad el resultado de la colisión entre dos 3-branas. Dado que las branas tienen masa y energía, deben estar sujetas a la fuerza gravitatoria; por lo tanto, es posible que dos branas próximas entre sí se atraigan hasta colisionar. Una vez lo hacen, la energía liberada se transformaría en las partículas que vemos hoy en día. El modelo de Turok y Steinhardt es cíclico: describe un universo donde dos branas chocan una y otra vez, para separarse de nuevo debido al choque. Cada colisión crea un nuevo Big Bang, dando lugar a una sucesión infinita de universos, cada uno ligeramente distinto, como muestra la figura. La idea, aunque muy original, no está exenta de problemas: en particular, la entropía tendría que aumentar de ciclo a ciclo debido a la segunda ley, así que tarde o temprano los universos tendrían que hallarse en *muerte térmica*.



netismo. En la teoría electromagnética hay dos tipos de cargas: positivas y negativas. Una partícula positiva se puede aniquilar con su antipartícula de carga opuesta y, lo que es más importante, la carga no puede crearse ni destruirse.

Podemos construir un modelo muy parecido a esto usando cuerdas abiertas en una brana. Para ver cómo funcionaría, imaginemos una serie de cuerdas abiertas pegadas a la 2-brana. Según un observador restringido a la 2-brana, cada cuerda son dos partículas puntuales que se mueven por la superficie. Podemos asociar a uno de los extremos una carga positiva y a otro una carga negativa. Eso dependerá de la dirección de las vibraciones en la cuerda.

Veamos qué pasa si el extremo positivo de una cuerda toca al negativo. Dado que las cuerdas son pegajosas, ambos se unirán y saldrán de la brana.

Tenemos el equivalente a la teoría electromagnética viviendo dentro de una 2-brana. Pero eso no es la única posibilidad: por ejemplo, podríamos añadir más 2-branas en una pila. En este caso, cada cuerda abierta tendría sus extremos pegados a una de ellas. Curiosamente, este es un sistema que emula las características de la cromodinámica cuántica, donde en lugar de un tipo de carga, hay tres, bautizados con colores: verde, rojo y azul. Esta es la interacción entre quarks que da lugar a las partículas que forman el núcleo atómico: los protones y neutrones.

Es posible construir teorías aún más complejas por el sencillo método de añadir más branas. De hecho, se puede añadir un número infinito de ellas, dando lugar a un número infinito de cargas. Esta idea fue esencial a la hora de dar con la confirmación más espectacular del principio holográfico hasta la fecha: la *correspondencia AdS/CFT*.

LA CORRESPONDENCIA ADS/CFT

A pesar de que el principio holográfico gozaba de una buena dosis de popularidad en la década de los noventa del siglo pasado, aún no había llegado una confirmación matemática lo suficiente-

mente potente como para que pasase a formar parte del paradigma imperante. Esa confirmación llegó en forma de un rompedor artículo escrito por el físico argentino Juan Maldacena, al que Leonard Susskind se refiere como el «maestro».

Maldacena logró dar el primer ejemplo específico de holografía que iba más allá de limitarse a afirmar que la información está almacenada en la frontera. Hasta la fecha, todo lo que había eran resultados cualitativos, donde quedaba claro que un sistema podía describirse con información almacenada en el área que lo envolvía, pero nadie sabía cómo. ¿Dónde exactamente se guardaba la información? ¿Cómo se podía reconstruir lo que sucedía en el volumen a partir de lo que ocurría en la superficie? Faltaba un decodificador: algo que permitiese alternar entre las descripciones del volumen y la frontera, haciendo explícita la correspondencia entre ambos.

Maldacena se fijó en un tipo particular de espacio-tiempo, llamado anti-de Sitter o AdS. El AdS es un espacio-tiempo curvo donde las geodésicas correspondientes a los objetos materiales vuelven a su punto de partida espacial tras un alejamiento finito y la luz puede llegar al infinito y volver. Hoy en día creemos que nuestro universo es precisamente lo contrario: su expansión se acelera, de forma que las partículas tienden a separarse más y más.

Una forma sencilla de imaginar la parte espacial del espacio AdS es comprimiéndola sobre un círculo, con un dibujo que se vuelve cada vez más intrincado a medida que nos movemos hacia su exterior. Un vistazo a la figura 3 clarificará la situación.

A pesar de lo que pueda parecer, el espacio no se encoge a medida que nos alejamos del centro: en realidad, los dibujos parecerán tener el mismo tamaño para cualquier observador, se encuentre donde se encuentre. Es decir, el espacio se ensancha hacia fuera, de forma que mantiene las dimensiones de los dibujos, a pesar de que nuestra representación en un círculo lo hace parecer más pequeño. Debido a esto, tenemos una cantidad infinita de espacio: por mucho que tratemos de salir, nunca llegaremos a la frontera.

Por supuesto, se trata de un modelo simplificado: el espacio-tiempo AdS tiene tres dimensiones espaciales, no dos, pero

FIG. 3

El espacio AdS, en una proyección finita. El mismo patrón se repite una y otra vez, pero es cada vez más pequeño a medida que nos aproximamos a la frontera. Hay una cantidad infinita de dibujos entre el centro y el borde.

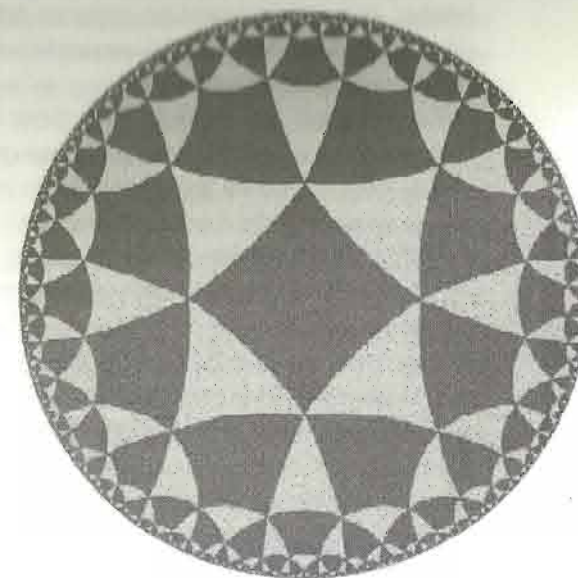
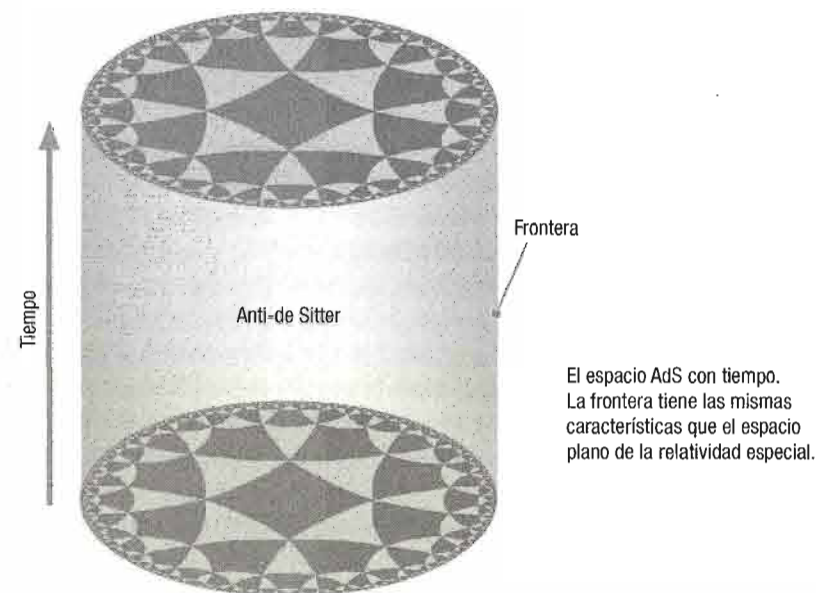


FIG. 4



es muy difícil, si no imposible, mostrarlas en una página. De hecho, es posible tener un espacio AdS en tantas dimensiones como se quiera: Maldacena, en su demostración, usó AdS de cuatro dimensiones espaciales.

La totalidad del espacio AdS tiene que contener también el tiempo. Para añadirlo, solo tenemos que poner un círculo encima de otro, como en una torre, de forma que la dirección ascendente corresponde a avanzar hacia el futuro (figura 4). De esta forma, el total del espacio AdS queda como un cilindro sólido, cuyas rodajas corresponden al espacio circular que se ha visto antes.

Hay una característica que hace que el espacio AdS sea el perfecto candidato para estudiar la holografía: la frontera de AdS es —dicho con una cierta simplificación técnica— un espacio-tiempo plano, como el de la relatividad especial, como el espacio-tiempo de *Minkowski*. La gracia del espacio-tiempo de Minkowski es que es el mismo espacio-tiempo en el que se desarrolla la mecánica cuántica de campos: todas las teorías cuánticas de campos, desde la teoría electrodébil hasta la cromodinámica cuántica, suceden en un espacio-tiempo relativista plano, ya que no incluyen la gravedad. Así pues, tenemos un espacio-tiempo curvo en el interior, AdS, cuya frontera es el espacio plano de la relatividad especial. Si somos capaces de demostrar que lo que ocurre en la frontera es equivalente, de alguna forma, a lo que pasa en el interior, habremos encontrado un ejemplo específico del principio holográfico.

Para lograrlo, Maldacena consideró un conjunto de N 3-branas apiladas una detrás de otra en un espacio de diez dimensiones. Moviéndose por las branas había cuerdas fundamentales, cuyos extremos estaban pegados a las distintas 3-branas. La idea era fijarse en dos situaciones distintas: el comportamiento de las branas cuando la interacción gravitatoria era débil y cuando era fuerte.

Recordemos que un conjunto de branas por las que pueden moverse cuerdas fundamentales es equivalente a una teoría cuántica de campos. Por ejemplo, tres branas apiladas dan lugar a algo muy parecido a la cromodinámica cuántica. N branas dan

lugar a una teoría de campos con N cargas, que se pueden imaginar como variaciones de la carga eléctrica. Así pues, analizar el comportamiento de los extremos de las cuerdas dentro de las 3-branas equivale a fijarse en una teoría cuántica de campos con N diferentes cargas.

Por otro lado, las branas tienen masa, lo que significa que curvan el espacio-tiempo a su alrededor. Si aumentamos la intensidad de la fuerza gravitatoria lo suficiente, las branas acabarán por formar un agujero negro. En realidad, se tratará de un tipo de agujero negro llamado de *Reissner-Nordström*, porque las branas tienen carga: es decir, tendremos un agujero negro que, además de masa, también tendrá carga eléctrica. Este tipo de agujeros negros son, sorprendentemente, más fáciles de analizar en teoría de cuerdas que los que son eléctricamente neutros.

Maldacena descubrió que podía predecir lo que sucedería en la frontera del espacio AdS, fijándose solo en lo que ocurría en el interior, y viceversa: es decir, había una correspondencia uno a uno entre los fenómenos que se daban en la frontera y en el interior. ¿Cómo es posible? Al fin y al cabo, el espacio AdS tiene una dimensión más que su frontera, así que parece lógico que se pierda algo de información por el camino.

Sin embargo, no es así. El truco está en la distorsión que produce el espacio AdS: vistos desde fuera, los dibujos tienen distintos tamaños, así que podemos deducir dónde se encuentra nuestra partícula simplemente fijándonos en la escala del dibujo. Es decir, hay una equivalencia entre la escala, en la frontera, y la dimensión radial, en el interior.

La idea de que la distorsión nos da la información que nos falta se entenderá mejor si volvemos al círculo inicial que muestra al espacio AdS. Una persona que se encuentre dentro del volumen percibirá todas las figuras como si tuviesen el mismo tamaño: sin embargo, eso no será así para alguien que se encuentre en la frontera. Para este, las figuras del interior se verán más grandes que las del exterior.

Un observador en la frontera no tendrá ninguna noción de distancia radial: todo se encuentra en su espacio bidimensional,

aunque tiene distintos tamaños. No obstante, podrá asociar esos tamaños a un número, que sustituirá a esa coordenada radial, de forma que tendrá en su poder la misma cantidad de información que un observador en el volumen. Esto se puede explicar alter-

nativamente refiriéndose a la energía: recordemos que la resolución a la que vemos algo depende de la energía que usemos. A más energía, mayor resolución y, por tanto, menor el tamaño de los objetos que podemos ver. Dado que los detalles que puede percibir un observador en la frontera dependen de la energía que utilice, podemos decir también que la escala energética de los objetos en la frontera hace las veces de distancia radial

en el volumen de nuestro espacio AdS.

Puede parecer extraño que la energía pueda ser usada como una alternativa a una dimensión espacial. ¿No se trata de conceptos completamente distintos? En realidad, no. Primero, la energía es solo un número, como la posición en el espacio. Cada número extra que necesitamos para explicar el estado de un objeto es una dimensión extra. Da igual si ese número se refiere al espacio, al tiempo o a la energía. Por otro lado, se trata de un resultado muy común en la mecánica cuántica, donde un sistema se puede describir en términos de las posiciones de sus partículas, pero también de sus energías. Recordemos que el principio de indeterminación nos dice que solo podemos conocer a la perfección o bien la posición o bien el momento de una partícula. La posición y el momento son cantidades complementarias: o bien sabemos una, o bien sabemos la otra. Toda la información relevante sobre nuestro sistema debe estar completamente codificada en una de las dos.

Esto nos da una idea: de la misma forma que podemos describir un sistema usando la posición de sus partículas, debería ser posible hacerlo con sus momentos. Es decir, en lugar de hablar del espacio, podemos hablar del «espacio de momentos» o

«espacio dual» y la física tendría que seguir funcionando de la misma manera. Se trata de un resultado con el que los físicos están familiarizados desde hace más de cien años y que se usa constantemente para simplificar cálculos: situaciones complicadas en el espacio se vuelven mucho más sencillas de analizar en el espacio de momentos y viceversa.

La complementariedad entre momento y posición es un tipo de *dualidad*: dos formas alternativas de ver un mismo sistema. Una dualidad nos dice que dos imágenes matemáticas distintas describen exactamente la misma física. Las dualidades son muy valiosas, tanto en física como en matemáticas, porque permiten saltar de una representación a otra con facilidad, buscando aquella donde un cierto problema es más fácil de resolver. Lo que descubrió Maldacena es también una dualidad, a la que bautizó como dualidad AdS/CFT, porque relaciona lo que sucede en el volumen de un espacio AdS con lo que pasa en su frontera, en la que se encuentra una teoría cuántica de campos de tipo CFT sin gravedad. Las siglas CFT significan *teoría conforme de campos*, donde el adjetivo «conforme» se refiere a un tipo especial de teoría, parecido a la cromodinámica cuántica pero con el añadido de que sus características no varían al cambiar la escala. La dualidad AdS/CFT afirma que tanto la teoría del volumen como la de la superficie describen la misma física: son dos descripciones complementarias y duales de un solo conjunto de fenómenos.

La teoría de Maldacena resulta crucial por dos aspectos: por un lado, muestra que dos teorías con distintos números de dimensiones pueden ser equivalentes. La teoría en el espacio AdS del volumen tiene una dimensión más que la teoría CFT en la frontera, lo que prueba de una vez por todas que es posible almacenar la información de un volumen en el área que lo envuelve. Con esto, el principio holográfico se vuelve poco discutible.

Por otro, Maldacena mostró no solo que la teoría del volumen podía ser equivalente a la de la frontera, sino que una teoría con gravedad era equivalente a una sin ella. Se trata de un logro enorme y chocante: recordemos que, durante décadas, los físicos habían intentado encontrar una teoría cuántica de la

JUAN MALDACENA

gravedad, sin éxito. Ahora resultaba que la gravedad se hallaba ya dentro de la teoría cuántica, pero revuelta hasta tal punto que resultaba irreconocible, como si la solución al problema de la gravedad cuántica se hubiese hallado ya en la teoría cuántica de campos, pero oculto en los detalles misteriosos de la holografía.

Por si fuera poco, la dualidad AdS/CFT era un elemento de peso en el debate sobre la pérdida de información en un agujero negro. La teoría del volumen incorporaba la gravedad, pero no así la de la frontera. Esta última es una teoría cuántica de campos, igual que la electrodinámica cuántica, por ejemplo. Y las teorías cuánticas de campos son bien entendidas y se sabe, con total seguridad, que no pierden información. Dado que todo lo que sucede en la frontera tiene un equivalente en el volumen y viceversa, la información también tiene que conservarse en la teoría gravitatoria. Pero, en el volumen, hay un agujero negro creado por las 3-branas que han colapsado: por lo tanto, los agujeros negros no pueden destruir información. A pesar de que lo que pueda parecer, la información se conserva.

Finalmente, la teoría de Maldacena proporcionó una nueva herramienta a la comunidad física, haciendo posibles cálculos impensables hasta la fecha. Su dualidad no solo relacionaba una teoría gravitatoria con otra cuántica: además, afirmaba que el comportamiento a alta energía en la teoría gravitatoria era equivalente al de baja energía en la teoría cuántica y viceversa. Resulta que, en la mecánica cuántica de campos, las situaciones de alta energía son muy difíciles de estudiar, debido a que la energía extra hace posible la creación de partículas, de forma que fenómenos aparentemente simples acaban siendo muy complicados de analizar. Ahora, gracias a la dualidad AdS/CFT, los físicos tenían una salida: para estudiar una teoría cuántica en el régimen de alta energía, solo tenían que buscar su equivalente gravitatorio y estudiar su comportamiento a baja energía. Una vez obtenida una respuesta en la teoría gravitatoria, bastaba con usar el traductor a la inversa para obtener un resultado en la teoría cuántica. Un cálculo antes imposible se había vuelto rutinario.

Aplicaciones

A pesar de que la dualidad AdS/CFT se centra en un tipo de teorías cuánticas que son muy distintas de las que tenemos en la realidad, ha sido posible usarla para estudiar una gran cantidad de fenómenos que, hasta la fecha, se resistían al análisis matemático. Puede parecer un logro eminentemente teórico, que se refiere a espacios de cinco dimensiones y agujeros negros. Sorprendentemente, se ha convertido en una herramienta esencial para varias disciplinas de la física experimental.

La primera área donde las aplicaciones de la dualidad de Maldacena resultaron evidentes fue la cromodinámica cuántica. Esta teoría, recordemos, gobierna la interacción entre quarks y gluones, las partículas que constituyen los núcleos atómicos. El problema de la cromodinámica cuántica es que es matemáticamente intratable: los gluones pueden interactuar consigo mismos y la fuerza de la interacción es tal que, incluso en las situaciones más sencillas, uno acaba con amasijos de millones de partículas generándose unas a otras. Normalmente, para realizar predicciones en una teoría cuántica uno se fija en lo que pasa a bajas energías, considerando al principio las situaciones más sencillas y complicando las posibilidades poco a poco. Esto se puede hacer porque las posibilidades más complicadas tienen un efecto poco importante en los cálculos finales.

Pongamos, por ejemplo, el caso de dos electrones intercambiando un fotón. Debido al principio de indeterminación, no podemos asegurar que eso sea todo lo que pasa. Por ejemplo, podría suceder que el primer electrón emitiera un fotón, luego otro, a este lo absorbiera el segundo electrón y al primero lo absorbiera después el mismo que lo había emitido. O que el fotón emitido por el primer fotón se convierta en un par de electrón y su antipartícula, el positrón, que se aniquilen entre sí y que al fotón resultante lo absorba el segundo electrón. En general, podemos complicar la situación tanto como queramos, añadiendo más fotones, electrones y positrones. Por suerte, cuanto más intrincado sea el correspondiente esquema menos afectará a nuestros cálculos, así que, a ciertos niveles de precisión, podemos

ignorar los diagramas más complejos. A esto se le llama usar la *teoría de perturbaciones*.

En la cromodinámica cuántica eso es imposible. Todos los diagramas de intercambios de partículas tienen el mismo peso: tanto los sencillos como los complicados afectan de la misma forma al resultado final. No podemos usar la teoría de perturbaciones y no tenemos forma de resolver el problema de forma exacta.

A pesar de que, a baja energía, la cromodinámica cuántica es muy diferente a una teoría conforme de campos, a alta energía ambas tienen cierto parecido. Así pues, es posible usar resultados obtenidos en la CFT para tener al menos una idea básica de cómo tendrían que comportarse las partículas en la cromodinámica cuántica. Esta situación se da en los aceleradores de partículas cuando, debido a las energías imperantes, se obtiene algo llamado un *plasma de quarks-gluones*, que es parecido al plasma del que se ha hablado antes, donde los protones y neutrones mismos acaban fragmentándose, dando lugar a una sopa formada por sus constituyentes.

Usando la dualidad AdS/CFT, es posible estudiar el plasma de quarks-gluones a través de la teoría gravitatoria dual: después, se deshace la transformación para obtener predicciones experimentales. A pesar de las diferencias entre las teorías conformes y la cromodinámica cuántica, los experimentos arrojan un parecido razonable con las predicciones de la dualidad AdS/CFT.

Otra aplicación de la dualidad de Maldacena se encuentra en la física de la materia condensada. Esta rama de la física estudia los sistemas de muchas partículas, como los sólidos cristalinos. Algunos de sus éxitos más notables en los últimos cien años son la descripción de los semiconductores, que llevó a la revolución en la electrónica, o el descubrimiento de los superconductores, materiales que conducen la electricidad sin resistencia eléctrica y que pueden ser usados, por ejemplo, para construir trenes de levitación magnética.

Los objetos que estudia la física de la materia condensada son, como en el caso de la cromodinámica cuántica, muy distintos de una teoría conforme. Sin embargo, es posible diseñar sistemas que entren dentro de esa categoría o que, al menos, se le aproxi-

men mucho. En un experimento de 2008, tres investigadores de la Universidad de California usaron la dualidad AdS/CFT para describir el comportamiento de una clase especial de superconductores que no podía ser analizada con los métodos convencionales. Además, la dualidad puede usarse a la inversa: empezando por una teoría gravitatoria y buscando posibles configuraciones que den lugar a condensados que aún no hayamos descubierto.

La física de la materia condensada puede acabar siendo importante en la confirmación de la dualidad AdS/CFT. En estos momentos hay físicos experimentales que están tratando de diseñar sistemas de partículas que se comporten de forma análoga a la teoría conforme en la frontera de AdS/CFT. Eso haría posible la confirmación experimental de la dualidad, sin requerir las vastas energías que de otra forma se necesitan en teoría de cuerdas. Recientemente, el físico israelí Jeff Steinhauer ha realizado un experimento en el que ha creado un análogo sónico de un agujero negro, usando algo llamado un *condensado de Bose-Einstein*, un tipo de gas donde los átomos se mueven como si fuesen una sola partícula. Según Steinhauer, el agujero emite el análogo para el sonido de la radiación de Hawking, lo que, de ser cierto, resultaría una confirmación indirecta de las predicciones de Hawking.

La dualidad AdS/CFT se puede aplicar también a la física de fluidos, en especial para tratar de entender el fenómeno de la turbulencia. Los fluidos turbulentos se vuelven matemáticamente intratables, de forma que hacen falta nuevas herramientas matemáticas para analizarlos. Usando la dualidad AdS/CFT, es posible buscar un análogo del fluido en la teoría gravitatoria, donde el horizonte de sucesos hace el papel del líquido, y buscar su evolución. Una vez encontrada, una traducción de la teoría gravitatoria al fluido logra arrojar luz sobre el comportamiento de este cuando se halla en un régimen turbulento.

AdS/CFT y el futuro

Hoy en día, apenas empezamos a rascar la superficie de lo que significan la dualidad AdS/CFT y el principio holográfico. El he-

cho de que dos descripciones con dimensionalidad distinta den lugar a la misma física nos dice que el espacio no es tan fundamental como creíamos. El sentimiento general es que el principio holográfico, junto con otros desarrollos en la física cuántica, nos tiene que llevar a una nueva teoría donde el espacio y el tiempo emerjan de una estructura más fundamental, de forma que la holografía sea una consecuencia obvia de la nueva forma de enfocar la física.

De momento, sigue sin haber una respuesta. Sin embargo, hay cada vez más ideas que parecen converger hacia una central: el espacio, el tiempo y la gravedad no son fundamentales, sino que surgen de las propiedades cuánticas de la materia.

Desarrollos recientes

El principio holográfico sigue siendo objeto de intenso estudio en el presente. Los últimos años han visto la aparición de distintas teorías que refinan y extienden el resultado de Maldacena. Todo apunta a una misma idea: tanto la gravedad como el espacio-tiempo son efectos secundarios de la mecánica cuántica.

La conjetura de Maldacena abrió más interrogantes de los que cerró. Si la teoría CFT sin gravedad en la frontera es equivalente a una teoría con gravedad en el interior, ¿de dónde surge esa gravedad? ¿Qué elemento de la teoría CFT es el que da lugar a la gravedad en su descripción dual? Hoy en día el interrogante sigue abierto, pero la respuesta empieza a vislumbrarse como un *leitmotiv* presente en todos los avances de la última década.

LA GRAVEDAD COMO ENTROPÍA

El artículo científico de moda en 2010 fue del físico holandés Erik Verlinde, que propuso una idea radical: la gravedad no existe, es el efecto de combinar la holografía con las leyes de la termodinámica. Según Verlinde, la gravedad es una *fuerza entrópica*: una fuerza ficticia que aparece debido a la tendencia de la materia a ocupar estados de mayor entropía.

El concepto de fuerza entrópica se puede entender fijándose en algo llamado el *movimiento browniano*. Es el movimiento que describe una mota de polvo en un líquido, debido a las coli-

siones aleatorias con las moléculas de la superficie. En la figura 1 se muestra un ejemplo de trayectoria browniana.

Hay otro ejemplo clásico de movimiento browniano: un grupo de borrachos saliendo del bar. Supongamos que los borrachos salen por la puerta y empiezan a moverse en direcciones completamente aleatorias. A cada paso cambian de dirección, de forma impredecible. ¿Qué trayectoria seguirán?

No se puede predecir con certeza el movimiento de los borrachos, pero sí podemos asegurar que, en promedio, se alejarán del bar. De hecho, se puede demostrar que su distancia al bar aumentará con la raíz cuadrada del tiempo transcurrido si suponemos que por cada unidad de tiempo dan un paso. Un gráfico de la evolución de la distancia al bar en función del tiempo se muestra en la figura 2. Por supuesto, este gráfico solo nos muestra la tendencia general: cuanto más de lejos observemos la trayectoria, más se parecerá a la de la figura.

Usando un poco de física elemental y fijándonos en la figura, podemos calcular la velocidad del borracho: sabemos que la velocidad es igual a la pendiente del gráfico que muestra la evolución de la distancia con el tiempo. Puesto que la pendiente disminuye con el tiempo, la velocidad también. Pero, si lo hace, debe de haber también una aceleración, ya que la aceleración se define como el cambio en la velocidad por unidad de tiempo. ¿Qué causa una aceleración? Una fuerza. Así pues, podemos describir el movimiento del borracho como si fuera causado por una fuerza que lo empuja lejos del bar. Esta fuerza disminuye con la distancia, de forma muy parecida a la de la gravedad, como se puede apreciar en la figura 3, aunque su signo es distinto, ya que aleja en vez de acercar. Las coincidencias no acaban ahí: todos los borrachos experimentan la misma aceleración sin que importe su masa, mientras que, en cambio, la fuerza que actúa sobre ellos sí es proporcional a esta. En la gravedad se da el mismo fenómeno: es la razón por la que una manzana y una bola de acero caen al mismo tiempo. Ambas tienen la misma aceleración, pero experimentan distintas fuerzas.

Lo curioso de toda esta situación es que, a pesar de las apariencias, no hay fuerza alguna. Como hemos visto, el movimien-

FIG. 1

Ejemplo de trayectoria de una partícula que sigue un movimiento browniano.

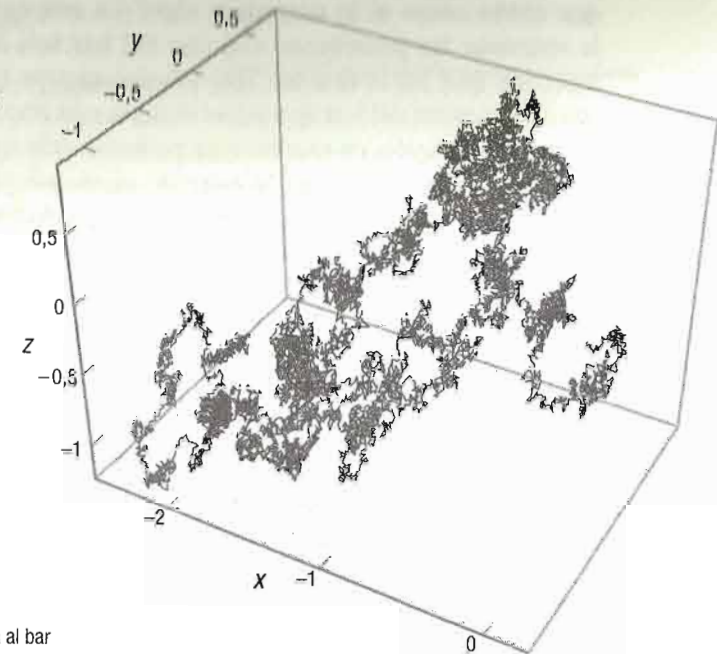
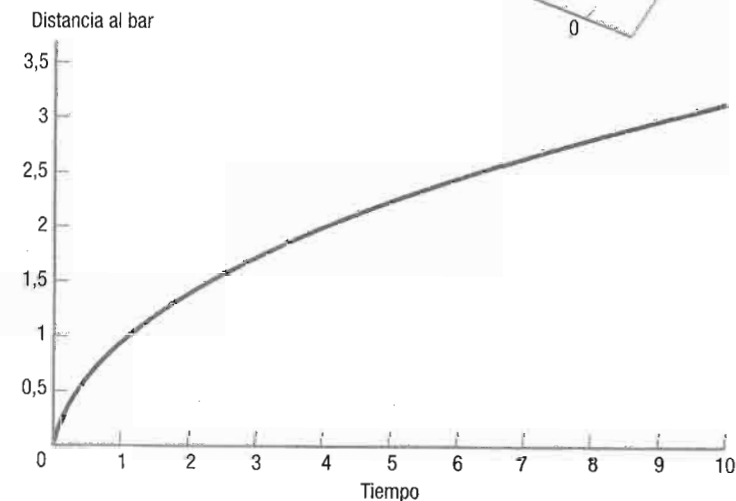


FIG. 2



Relación entre la distancia al bar y el tiempo. La trayectoria real se aproximará cada vez más a la que se muestra cuanto mayores sean los intervalos de tiempo que consideremos.

to del borracho es completamente aleatorio. ¿Cómo puede ser que actúe como si lo empujara algo? La respuesta se halla en la entropía: las posiciones alejadas del bar son mucho más numerosas que las cercanas. Hay mucho menos espacio para el borracho cerca del bar que lejos: si tiene que encontrarse en una posición aleatoria, es mucho más probable que se halle lejos del bar. No es que una fuerza lo empuje: es simple probabilidad. El borracho se mueve hacia posiciones más probables, simplemente porque hay más. Pero esto no es más que la segunda ley de la termodinámica: la entropía de un sistema tiende a aumentar. Es decir, el aumento de la entropía causa lo que parece una fuerza, pero en realidad no lo es.

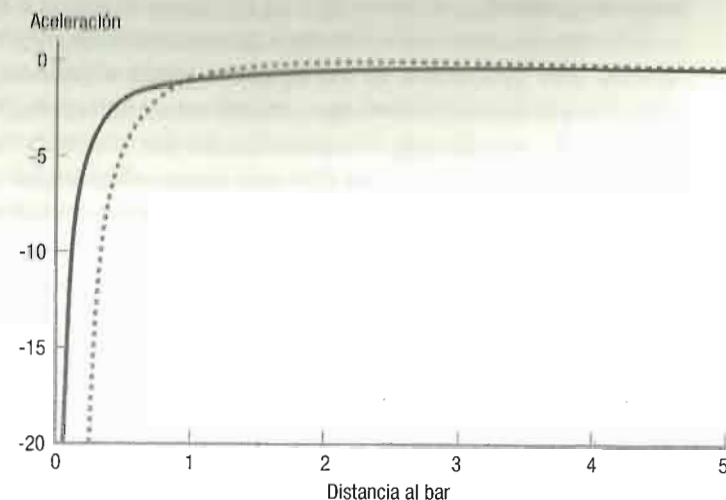
Por supuesto, esto solo funciona de media. Es decir, si miramos el movimiento del borracho a intervalos muy cortos de tiempo no percibiremos esa tendencia a alejarse del bar. Solo nos percataremos cuando analicemos su movimiento a intervalos mucho mayores que la duración de un paso. En general, podemos esperar que las fuerzas entrópicas solo se manifiesten en esas condiciones.

Esto nos da una idea: ¿y si hubiera efectos parecidos cuyos «pasos» tuviesen una duración tan corta que solo pudiésemos observar el movimiento a gran escala? Podríamos ser testigos de un gran número de fuerzas entrópicas sin sospecharlo jamás. Ese, dice Verlinde, es el caso de la gravedad.

Para entender cómo la entropía puede crear algo parecido a la gravedad, imaginemos primero un plato lleno de guisantes, repartidos uniformemente. Si ahora damos un golpe al plato, los guisantes se moverán de forma aleatoria hasta llegar a una nueva posición. Cuando nos fijemos de nuevo en el plato, veremos que los guisantes se han agrupado, como si se atrajesen mutuamente. Pero no hay atracción alguna: simplemente, las configuraciones con grumos son más probables que aquellas sin ellos.

El físico Johannes Koelman propone una forma algo más rigurosa de aproximarse al asunto, imaginando lo que llama un «universo Mikado». En el juego de Mikado, los jugadores dejan caer una serie de pequeños palillos en la mesa de forma aleatoria, como se muestra en la figura 4.

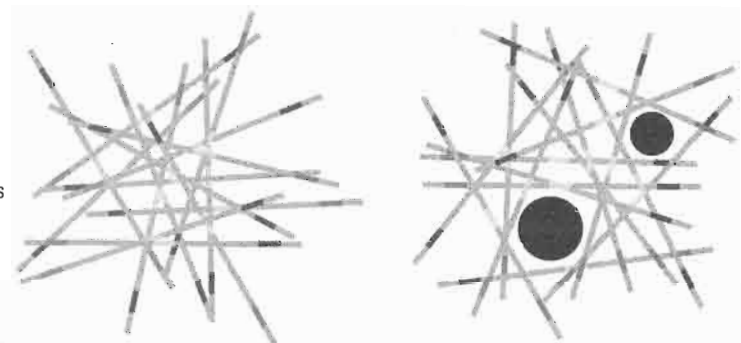
FIG. 3



La fuerza entrópica que aleja del bar y la fuerza de la gravedad son fuerzas que decaen con la distancia. La curva de puntos representa una fuerza repulsiva proporcional al cuadrado de la distancia.

FIG. 4

A la izquierda, una configuración aleatoria de palillos de Mikado; a la derecha, una configuración con dos agujeros, mostrados con los círculos sólidos.



Supongamos ahora que solo nos interesan las configuraciones donde, por casualidad, hayan quedado dos agujeros, como se muestra en la parte derecha de la misma figura. Empezamos con los dos agujeros situados a ambos extremos: si se mueven

de forma aleatoria, ¿es más probable que se aproximen entre sí o que se alejen?

Una rápida inspección revelará que los estados próximos son mucho más probables. Si los agujeros están al lado el uno del otro, los palillos no tienen que evitarlos por separado, lo que es mucho más sencillo, de la misma forma que es mucho más fácil evitar dos balas juntas que dos que salgan disparadas a medio metro de distancia. Así pues, hay muchas más configuraciones con los agujeros juntos que separados.

Si nos dedicamos a dar pequeños golpes en la mesa y observamos el sistema durante un intervalo de tiempo lo suficientemente grande, veremos cómo los agujeros se acercan entre sí, como si hubiese una fuerza atractiva entre ellos. Por si fuera poco, esa fuerza dependerá de su radio, que en este caso hace las veces de la masa. Si imaginamos que los agujeros son agujeros negros cuyo radio es proporcional a su masa, obtenemos la ley de la gravitación universal de Newton.

La idea de Verlinde es parecida, pero en tres dimensiones. Depende, además, de la holografía para funcionar bien. Verlinde empieza considerando un espacio demarcado por una pantalla holográfica plana. A la derecha, digamos, hay el espacio que ya ha emergido de la información almacenada en la pantalla; a la izquierda, aún no ha emergido el espacio.

Verlinde supone que la pantalla holográfica se comporta como el horizonte de sucesos de un agujero negro: es decir, contiene toda la información necesaria para reconstruir todo lo que sucede a su izquierda. Además, contiene cierta información sobre lo que sucede a la derecha. Recordemos que en el argumento de Bekenstein que se expuso en el capítulo 4 la mínima cantidad de información incorporada al agujero era la aportada por una partícula cuyo tamaño fuese igual a la llamada longitud de Compton correspondiente a su masa. En el cálculo de Bekenstein, el tamaño de la partícula desempeña el papel de ser la distancia al horizonte para la que se calcula la energía de la partícula. El menor tamaño posible, recordemos, sería el de una partícula con un tamaño igual a su longitud de Compton. Verlinde establece que la entropía relacionada con la información contenida en su

pantalla aumente proporcionalmente al número de veces que la distancia a la que la partícula ya influye en la pantalla sea mayor que su longitud de Compton. A partir de ahí se puede derivar la ley de Newton $F = ma$.

Para derivar la de la gravitación universal el resto es relativamente sencillo. Consideremos una pantalla esférica, como en el caso de un agujero negro. Suponiendo que la información está repartida uniformemente por ella y que cada bit contiene un poco de energía, podemos calcular la masa de la pantalla. De ahí, es fácil demostrar que la atracción «gravitatoria» entre la pantalla y la partícula sigue exactamente la misma fórmula que la gravitación universal de Newton, aunque para deducirla no se ha usado la gravedad en ningún momento. Surge como resultado de aplicar la segunda ley de la termodinámica junto con el principio holográfico.

Por desgracia, la teoría de Verlinde es poco más que una idea novedosa, que aún necesita mucho trabajo para llegar a algo más fundamental. Por ejemplo, su tratamiento es completamente clásico: a pesar de que usa algunas fórmulas derivadas de la mecánica cuántica, la teoría resultante no es cuántica, sino clásica. Queda por ver cómo se aplicaría esta idea en sistemas cuánticos y, en particular, cómo podría distinguirse de otras competidoras: de momento, sus predicciones son exactamente las mismas que las de la relatividad general de Einstein, con lo que no hay forma de ponerla a prueba.

La teoría ha recibido varias críticas, algunas más afortunadas que otras. Peter Woit (n. 1957), físico y famoso oponente de la teoría de cuerdas, la considera prácticamente una afrenta, al ser poco ortodoxa y abandonar las lecciones del modelo estándar. Según él, es preocupante que tantos físicos se dediquen a la supuestamente «nueva física» que no es posible confirmar experimentalmente solo para ganar repercusión mediática. Dado que la idea de Verlinde no pretende sustituir el modelo estándar, sino

Mi idea es que en una teoría en la que el espacio es emergente las fuerzas se basan en diferencias en el contenido de información, y que procesos aleatorios microscópicos muy generales causan la inercia y el movimiento.

ERIK VERLINDE

simplemente compartir una intuición que debe ser desarrollada posteriormente, la crítica parece algo desmedida.

Otra objeción con un poco más de fundamento es que, según la teoría de Verlinde, la interacción gravitatoria debería destruir la reversibilidad cuántica, algo que no se observa. En la teoría de Verlinde la interacción gravitatoria incrementa la entropía: como la entropía no puede jamás disminuir, debemos concluir que la interacción gravitatoria es irreversible. Sin embargo, sabemos por la mecánica cuántica que las ecuaciones fundamentales son reversibles, con lo cual la teoría de Verlinde queda descartada.

A esta crítica, Verlinde responde que su teoría es perfectamente reversible. Aunque es cierto que la gravedad lleva asociado un aumento de la entropía, no es cierto que el aumento de entropía sea irreversible. La entropía es un concepto estadístico: siempre aumenta, de promedio. Sin embargo, no hay nada en las leyes fundamentales de la física que impida que disminuya y, de hecho, lo hace en sistemas lo suficientemente pequeños. Que la probabilidad de que el sistema revierta a su estado original sea muy pequeña no invalida que la reversibilidad sea posible, al menos en principio.

A pesar de los éxitos de la teoría de Verlinde, seguimos sin saber qué es lo que hace la pantalla holográfica para causar la interacción gravitatoria. Por ejemplo, ¿por qué aumenta la entropía al acercarse la partícula a la pantalla holográfica? Verlinde se ve obligado a postularlo, basándose en los resultados previos de Bekenstein y Hawking, que parten de las leyes de la gravedad y la mecánica cuántica. De hecho, algunos críticos apuntan que no tiene mérito alguno deducir la gravedad a partir del principio holográfico, ya que el principio holográfico es una consecuencia directa de la gravedad, de forma que el razonamiento es circular. En general, seguimos sin tener una idea de qué sucede en la pantalla y de cómo crea la gravedad exactamente. Sin embargo, tenemos ciertas pistas: por un lado, sabemos que la gravedad tiene que surgir de una superficie con una dimensión menos que nuestro espacio. Por el otro, que parece estar relacionada con el aumento de la entropía.

ENTRELAZAMIENTO Y AGUJEROS DE GUSANO

La siguiente pista en el rompecabezas de la gravedad cuántica viene de un artículo de Maldacena y Susskind publicado en 2013. En él proponen una idea que, a primera vista, parece descabellada: el *entrelazamiento cuántico* y los agujeros de gusano son un mismo fenómeno.

El entrelazamiento es un fenómeno estrictamente cuántico que se da entre pares de partículas. La idea básica es que las propiedades de una determinan las de la otra, como si ambas estuvieran atadas por una cuerda invisible que les comunica instantáneamente la información. Irónicamente fue Einstein, un gran detractor de la mecánica cuántica, quien descubrió esta propiedad. Einstein creía que el hecho de que la teoría predijese algo que parecía una acción instantánea a larga distancia convencería a la comunidad de que la mecánica cuántica no podía ser cierta. Para su desgracia, resultó que el entrelazamiento es real y puede observarse en el laboratorio.

La forma más sencilla de entender el entrelazamiento cuántico es fijarse en un par de partículas de las que queremos conocer su espín, una magnitud cuántica asociada a la «rotación» de una partícula sobre su eje (recuérdese lo que se dijo en el recuadro «Enanas blancas y el principio de exclusión de Pauli» de la pág. 38 sobre el significado de esta magnitud). De un llamado «número cuántico de espín», o simplemente «espín», si no hay posibilidad de confusión, dependen los valores que la proyección del espín sobre una dirección espacial dada puede tomar. En el caso del electrón y otras partículas, el número cuántico de espín, o simplemente espín, es $\frac{1}{2}$, lo que quiere decir que el espín puede tomar solo dos valores, a los que para diferenciarlos llamaremos «espín arriba» y «espín abajo». Los espines se pueden sumar. Un sistema con dos partículas con número cuántico de espín $\frac{1}{2}$ podrá tener un número cuántico de espín 1 o un número cuántico de espín 0. Aquí nos vamos a servir de este segundo caso.

De que el espín total sea cero se sigue que solo hay dos posibilidades: o bien la primera partícula tiene espín abajo y la segunda arriba para una determinada dirección, a la que vamos

a llamar eje z , o bien al revés. Pero, en la mecánica cuántica, si el estado de un sistema es compatible con varias posibilidades, ese estado será una suma ponderada o «superposición» de esas posibilidades: así pues, en nuestro caso se halla en una superposición, con igual probabilidad, entre espín arriba y espín abajo, por una parte, y espín abajo y espín arriba por la otra.

Supongamos ahora que tomamos una de las dos partículas y, sin realizar medición alguna, la llevamos a la Luna. Dado que no las hemos medido, el estado de cada una de las partículas es una mezcla de los estados de una sola partícula de espín arriba y de espín abajo según el eje z . El espín total, aunque tenga menos sentido hablar de él con esta separación, sigue siendo cero.

Ahora medimos en la Tierra el espín de la partícula según el eje z y obtenemos, por ejemplo, el valor abajo. Dado que el espín total es cero, eso significa que el espín de la partícula en la Luna tiene que ser arriba. No sorprende, ya que ambas partículas han estado íntimamente unidas. Pero si a continuación medimos la partícula de la Tierra, que ahora tiene un valor definido para el eje z , el espín en una dirección perpendicular a la primera, llamémosla eje x , para la que solo sabemos que es igualmente probable que una medición arroje uno de los dos valores posibles, y obtenemos, de esos dos valores posibles, el convencionalmente denominado «arriba», al medir la partícula de la Luna obtendremos el valor abajo. Es decir, el estado de la partícula en la Luna ha cambiado, sin que nosotros hayamos interactuado con ella: cualquier modificación realizada en la partícula terrestre la afecta directamente. Decimos que ambas partículas están *entrelazadas*: se encuentran en un estado tal que cualquier cambio en una se ve reflejado inmediatamente en la otra.

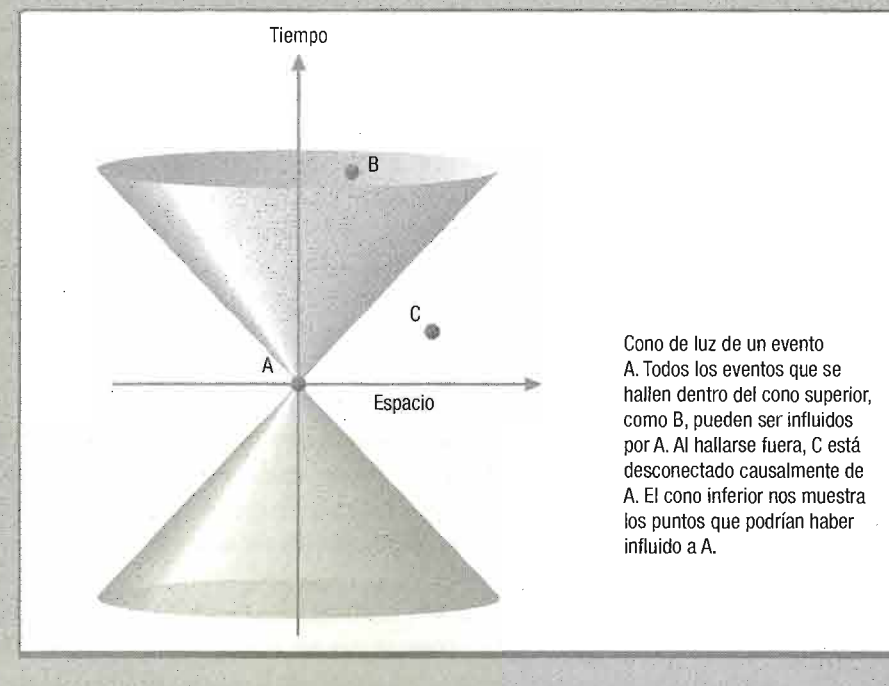
Al entrelazamiento cuántico a veces se le suele llamar EPR, por Einstein, Podolsky y Rosen, que descubrieron la aparente paradoja de la transmisión instantánea de información.

A pesar de lo que pueda parecer, el entrelazamiento cuántico no viola la causalidad, lo que en física significa que no transmite información más rápido que la luz. No hay ningún experimento que pueda realizarse que permita usar la medida en la Tierra para transmitir información instantáneamente

CAUSALIDAD Y FÍSICA

La noción cotidiana de causa y efecto se tiene que revisar en el contexto de la física. Normalmente, decimos que un hecho causa otro cuando, de no haberse producido el primero, el segundo tampoco lo habría hecho. Sin embargo, si aplicamos esta definición a la física, vemos que nos da resultados aparentemente absurdos. Todas las leyes de la física, excepto las de la termodinámica, que son estadísticas, son simétricas respecto a pasado y futuro. Es decir, podemos usar las leyes de Newton para predecir el futuro, pero también para deducir el pasado. Solo necesitamos conocer el estado del universo en un cierto instante: a partir de ahí, las leyes lo determinan para todo instante pasado y futuro. En este sentido, podemos decir que el presente causa el futuro, pero también podríamos afirmar, con la misma validez, que es el futuro el que causa el presente.

Así pues, la noción de causalidad en física usa criterios distintos. En particular, nos preguntamos si un hecho que sucede en un cierto punto en el espacio podría haber influido en otro situado a una cierta distancia en el espacio y el tiempo. La respuesta es afirmativa solo si un fotón hubiera tenido tiempo de viajar entre ellos. Esto lo podemos representar en un diagrama espacio-temporal, donde los fotones son líneas diagonales: dos puntos están en contacto causal solo si se encuentran dentro del *cono de luz* del otro, que viene dado por las trayectorias de los fotones.



a la Luna. La secuencia de arriba y abajo que el observador de la Tierra, por ejemplo, pueda obtener en sus mediciones no sirve para codificar en ella el mensaje que quiera, pues es una secuencia aleatoria que no puede controlar. Y se puede demostrar que jugando con las mediciones que se hagan en la Tierra no se pueden modificar las estadísticas de las mediciones de la Luna. Por ejemplo, si en la Tierra se va midiendo el espín en direcciones distintas, no perpendiculares entre sí, el grado de coincidencia entre sus arriba y abajo y los abajo y arriba que se obtengan en la Luna si allí siguen midiendo en la dirección x ya no será perfecto, pero en la Luna seguirán observando una secuencia aleatoria de arribas y abajos de la que no podrían sacar ninguna información.

Por otra parte, la idea de instantaneidad que se usa en discusiones como la anterior no es relativista. Según la relatividad especial, para un observador en movimiento suficientemente rápido con respecto a la Tierra y la Luna no serían instantáneas las mediciones que nosotros tomaríamos como tales. Sería relativo quién habría modificado la secuencia de mediciones de quién. Supongamos que en la Tierra se pudiese, en contra de lo dicho antes, preparar las mediciones de forma que con sus resultados se codificara un mensaje que el observador de la Luna, con las suyas y las correlaciones del entrelazamiento, podría leer. Pero para un rápido observador lejano las mediciones de la Luna quizá sucediesen antes que la de la Tierra. ¡Como si fuese en esas mediciones lunares en las que se hubiera escrito el mensaje cuando sabemos que hemos sido nosotros, en la Tierra, quienes lo hemos escrito!

La característica clave aquí es que el entrelazamiento cuántico relaciona dos sistemas instantáneamente sin vulnerar la causalidad. Se trata de algo que parece exclusivo de la mecánica cuántica, pero que se encuentra también en un sistema completamente distinto: dos universos o partes de universo unidos por un agujero de gusano.

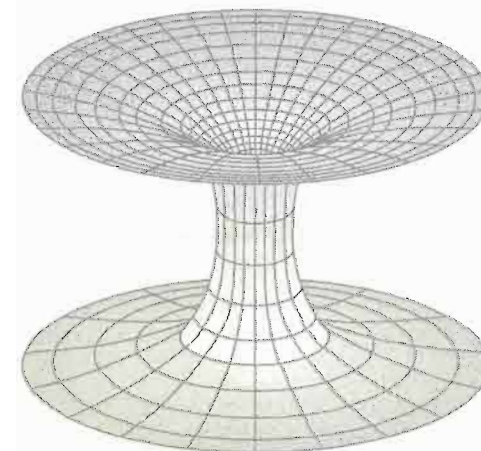
Los agujeros de gusano son también conocidos como *puentes de Einstein-Rosen*, o *ER*, para abreviar. Como se explicó previamente, un agujero de gusano consiste en la conexión de dos uni-

versos paralelos a través de un agujero negro común a los dos, tal y como sucede en la solución de Schwarzschild completa (o, en otras posibles soluciones de las ecuaciones de Einstein, entre dos regiones de un mismo universo). Recordemos el diagrama de Penrose correspondiente (véase la figura de la pág. 90).

A la derecha, tenemos nuestro universo; a la izquierda, su extensión matemática. Como puede apreciarse, son perfectamente simétricos y comparten un mismo interior de agujero negro (el triángulo de arriba), pero en cada uno de esos universos se entra en él por su propio horizonte; ambos horizontes solo coinciden en el punto central del diagrama. Recordemos también que el diagrama es espacio-temporal. La recta que une el centro del diagrama con los dos vértices a su derecha y su izquierda representa un corte espacial de ese continuo espacio-temporal definido. Esa superficie, suprimiendo una de sus dimensiones para poder visualizarla e imaginándola entonces sumergida en un espacio tridimensional plano, tendría el aspecto que se muestra en la figura 5.

Las dos partes abocinadas de arriba y de abajo son los dos universos paralelos: aunque no se perciba claramente en la figura, esas bocinas, suficientemente lejos del agujero, acaban siendo

FIG. 5



Representación
esquemática de
un agujero de gusano.

EN LAS CERCANÍAS DE UN AGUJERO NEGRO

Las representaciones habituales de una sección espacial de la geometría del espacio-tiempo en los alrededores de un agujero negro ilustran cómo se la vería en un espacio imaginario donde «flotase». Esas formas no deben confundirse con lo que se le presentaría a la vista a un viajero espacial que se acercase a un agujero negro en nuestro mundo real. Las dos simulaciones por ordenador presentadas en esta doble página dan una idea de cómo sería.

EL DISCO DE GAS

La imagen muestra cómo se vería un disco de gas que, atraído hacia el agujero, lo rodease ecuatorialmente, un disco que estuviese casi de canto con respecto al observador. La gravedad del agujero distorsiona la imagen hasta el punto de que la arquea por encima y por debajo del plano donde se encuentra el gas. El círculo interno brillante es la luz que rodea circularmente al agujero antes de escapar hacia el observador (es un tipo de trayectoria posible para la luz en las cercanías del horizonte de sucesos).

UN AGUJERO NEGRO SUPERMASSIVO
Esta recreación ilustra las distorsiones de la imagen de las estrellas al pasar su luz muy cerca de un agujero negro tan grande como los que hay en el centro de las galaxias. El círculo negro es el horizonte de sucesos (en realidad una esfera). Su poderoso campo gravitatorio desvía la luz y va disponiendo circularmente la imagen deformada de los astros.



planas, porque eso es lo que ocurre con la solución de Schwarzschild. La parte más estrecha del «cuello» es el horizonte de sucesos compartido por ambos «mundos» (restituida la dimensión suprimida, el horizonte es una esfera). Ya sabemos que la situación descrita por el diagrama de Penrose de la pág. 90 no es real: describe un agujero negro (con dos horizontes, o dos agujeros con un interior común, como se quiera decir) y un universo (dos en realidad) eternos. Pero supongamos por un momento que correspondiese a la realidad. La cuestión es: ¿se podría usar la estructura de la figura 6 para pasar de un universo a otro? Lo primero es entender que una partícula material o un rayo de luz no pueden circular por las líneas radiales curvas representadas en la figura ni por ninguna otra trayectoria que descanse en la superficie representada: esta es un corte espacial y las partículas se mueven, claro está, a través del espacio-tiempo. Hay que imaginar una sucesión de estructuras espaciales como la anterior. Las partículas irán pasando de unas a otras. Parece que esta última frase debería completarse con el añadido «a lo largo del tiempo», pero resulta que las partículas que quieran ir de un universo al otro habrán de internarse en el agujero negro y ya sabemos que dentro del agujero la coordenada radial hace las veces de coordenada temporal (aunque las estructuras de la sucesión abarcan, cada una lo hace, todo el espacio, y su parte externa al agujero sí corresponderá al transcurso del tiempo tal y como lo marca la coordenada temporal). Para las partículas el radio avanza inexorablemente hacia su valor nulo, la singularidad. La sucesión pertinente de estructuras espaciales corresponde a cortes espaciales a través del diagrama caracterizados por valores de la distancia radial mínima al centro cada vez menores (no hay un único tipo de corte espacial posible, pero esto carece de importancia para nuestros propósitos). A medida que la distancia radial mínima al centro va disminuyendo, y por lo tanto va aumentando la distancia al horizonte ya traspasado, las estructuras tienen un cuello más estrecho y alargado (pero téngase siempre en cuenta que las partículas no se encuentran en el hueco del tubo, sino sobre sus paredes, que son la superficie espacial en sí, mientras que el hueco solo existe por la inmersión imaginaria en una dimensión más), y los dos horizontes ya no

coinciden: uno queda en la mitad de arriba y el otro en la de abajo, separados por la parte donde se ha alargado el cuello. Finalmente, tras quedar unidas solo por la singularidad, la mitad superior y la inferior del puente se separan por completo y hay dos singularidades distintas.

A ninguna partícula o rayo de luz le da «tiempo» a pasar de la parte de arriba a la de abajo, de un universo a otro pues, «saltando» de unas estructuras a otras de pasadizo cada vez más angosto y sin caer en la singularidad: el agujero de gusano de Schwarzschild no es transitable. Pero cabe pensar en otras soluciones de

las ecuaciones de Einstein que sí lo sean. Si el cuello de la estructura representada en la figura no se cerrase, si se pudiese mantenerlo abierto, las partículas sí podrían pasar de un lado al otro. Imagínese un espacio-tiempo en el que se pudiesen hacer cortes espaciales todos los cuales fuesen iguales a la estructura de la figura. No habría singularidad; las partículas podrían ir saltando siempre de unas a otras de esas estructuras espaciales estáticas hasta llegar al otro lado. Se han escrito soluciones que equivalen a agujeros de gusano transitables, pero requieren la existencia de materia «exótica», materia con propiedades muy extrañas. Es muy dudoso que existan o se puedan construir agujeros de gusano así en la realidad. En cualquier caso, un cambio en el lado derecho del diagrama podría afectar casi inmediatamente al izquierdo si los uniese un agujero de gusano transitable: las leyes relativistas de la causalidad se violarían.

Los paralelos son claros: tanto en los agujeros de gusano no transitables como en las partículas entrelazadas no hay una transmisión instantánea de información, pese a lo que apresuradamente se pudiese pensar en un principio; en ambos casos parece que se viola la causalidad, aunque no es así.

Hay otra coincidencia interesante entre los agujeros negros y las partículas elementales: un agujero negro puede ser definido con solo tres números. Si sabemos su masa, su carga y su momen-

Sostenemos que el puente de Einstein-Rosen entre dos agujeros negros es creado por correlaciones de tipo EPR entre los microestados de dos agujeros negros.

JUAN MALDACENA Y LEONARD SUSSKIND

AGUJEROS DE GUSANO Y VIAJES EN EL TIEMPO

Además de comunicar dos universos paralelos, un agujero de gusano transitable ofrecería la intrigante posibilidad de viajar en el tiempo. Supongamos que, de alguna forma, logramos crear un agujero de gusano cuyas dos bocas se encuentran a metros de distancia vistos desde fuera. Ahora tomemos una de las bocas y llevémosla de viaje, un viaje de ida y vuelta acelerado hasta alcanzar velocidades que sean una buena parte de la velocidad de la luz.

La materia exótica

Nos encontramos con varias dificultades. Por ejemplo, el agujero de gusano de un agujero negro de Schwarzschild se refiere a un ineludible agujero negro eterno. Sin embargo, hay otras soluciones en las que usando *materia exótica* se podría atravesar un agujero de gusano real. La materia exótica es materia con propiedades que no se observan en la materia ordinaria. Se trata de una denominación que se usa para muchos tipos distintos de partículas pero, en este caso, se refiere a materia con una densidad de energía negativa. Si la materia tiene masa negativa, esperamos que se comporte de forma inversa a la materia ordinaria: es decir, en lugar de aumentar la curvatura del agujero negro, tendría que cancelarla. Eso nos permitiría atravesar el agujero de gusano. La relatividad general no permite la existencia de materia exótica, pero la mecánica cuántica sí lo hace, al menos en principio. El problema es lograr crear una cantidad suficiente de materia exótica que nos permita atravesar el agujero de gusano.

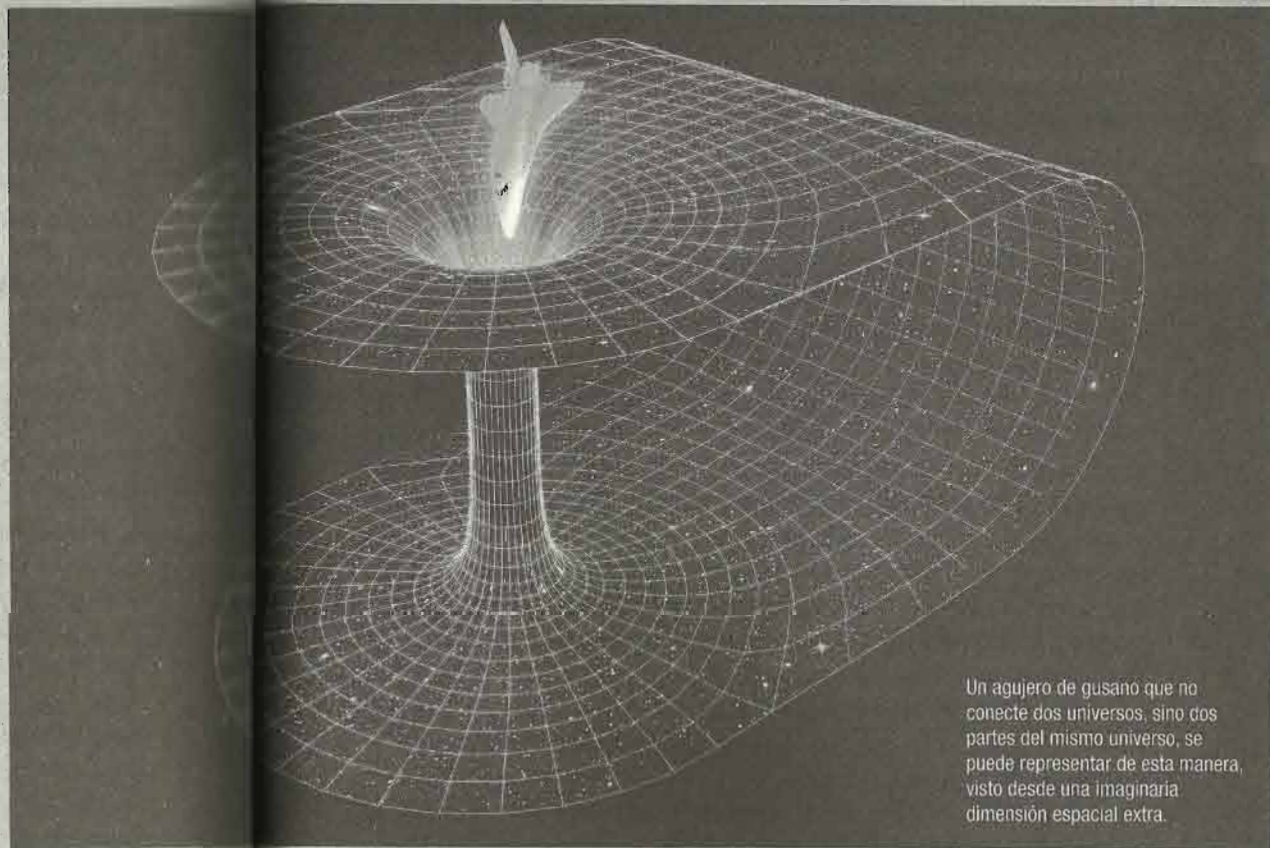
Una puerta al pasado...

Suponiendo que, de alguna forma, hemos logrado mantener abierto el agujero de gusano, podemos preguntarnos ahora si es posible usarlo para viajar en el tiempo. Dado que las dos bocas están comunicadas casi instantáneamente, cualquier objeto que entre por una aparecerá en la otra de inmediato. Así pues, como mínimo es posible usar un agujero negro para viajar más rápido que la luz entre dos regiones del espacio, lo que equivale a viajar en el tiempo, en el sentido de que se trata de dos regiones desconectadas causalmente. Para la boca que ha viajado el tiempo ha pasado más lentamente que en el laboratorio desde el que partió. Es una conocida consecuencia del movimiento acelerado hasta velocidades muy altas en la relatividad especial, la llamada paradoja de los gemelos: el gemelo que ha viajado a velocidades cercanas a la de la luz y regresa se encuentra con que su hermano es ahora más viejo que él. Para un astronauta que haya viajado con la boca, habrán pasado quizá unos días, quizá sólo unas horas o unos minutos, mientras que en el laboratorio habrán transcurrido decenios o siglos, o un tiempo indefinidamente gigantesco si la velocidad del viaje fue muy, muy cercana a la de la luz. El astronauta, así, ha viajado hacia el futuro. Pero si entonces alguien pasa por la boca que ha viajado, al salir por el otro lado se encontrará en el pasado quizá

ya remoto, en la época en que el viaje comenzó. Otra forma de usar un agujero de gusano como máquina del tiempo sería acercar una de las bocas a un agujero negro, en cuya proximidad el tiempo va más despacio.

... que quizá se cierre

A pesar de todo, la posibilidad de viajar hacia atrás en el tiempo podría no ser posible ni siquiera suponiendo que se pudiera contar con la materia exótica adecuada: según algunos cálculos, las partículas virtuales que cruzasen el agujero de gusano crearían un bucle retroalimentado que acabaría por destruirlo en microsegundos. Podría quizá haber también, sin embargo, formas de solventar ese problema.



Un agujero de gusano que no conecte dos universos, sino dos partes del mismo universo, se puede representar de esta manera, visto desde una imaginaria dimensión espacial extra.

to angular, sabemos todo lo que hay que saber sobre él. Curiosamente, el mismo caso se da para las partículas elementales, que se pueden definir con los mismos tres números. Es como si un agujero negro fuera un caso extremo de una partícula elemental.

En teoría de cuerdas, esta intuición cobra aún más relevancia. Recordemos que las cuerdas son objetos microscópicos que pueden vibrar a distintas frecuencias. A medida que les damos más energía, su vibración se hace más rápida y su longitud crece. Podemos seguir haciendo esto hasta que la cuerda tenga tanta energía que acabe por formar un horizonte de sucesos: nuestra cuerda fundamental se ha transformado en un agujero negro. Seguimos teniendo una sola partícula elemental, la cuerda, y el agujero negro no es más que un estado excitado de esta. De hecho, en su cálculo de la entropía de un agujero negro, Susskind utilizó precisamente esa idea. Un agujero negro podría no ser más que una cuerda enorme enrollada sobre sí misma, como un ovillo, siendo la radiación de Hawking causada por los pequeños retales que sobresalen del horizonte de sucesos.

Todos esos paralelos hacen pensar que existe una relación estrecha entre los agujeros de gusano y el entrelazamiento cuántico. Maldacena y Susskind proponen que los dos fenómenos no solo están relacionados, sino que son el mismo. En su formulación, $ER=EPR$. Es decir, un puente de Einstein-Rosen es equivalente a la paradoja Einstein-Podolsky-Rosen: el entrelazamiento cuántico y los agujeros de gusano son dos caras de la misma moneda.

Según Maldacena y Susskind, entre dos partículas entrelazadas tiene que haber un agujero de gusano; de forma similar, dos agujeros negros unidos por un agujero de gusano tienen que estar entrelazados. Ambos fenómenos son indistinguibles.

La idea de Maldacena y Susskind es la primera en sugerir cómo los efectos gravitatorios en el volumen pueden surgir de la teoría cuántica en la frontera. Tenemos dos teorías completamente distintas: por un lado, la relatividad general de Einstein, que no es una teoría cuántica. Los objetos que nos ocupan en esta teoría, los agujeros de gusano, son una deformación del espacio-tiempo: es decir, forman parte de la geometría. Por otro lado, tenemos la teoría cuántica, donde la gravedad no juega papel alguno y el entre-

lazamiento es un fenómeno puramente cuántico. Resulta que hay una relación estrecha entre ambas: es como si, visto de una forma, el entrelazamiento fuese solo una relación cuántica; visto de otra, puede interpretarse como una modificación de la geometría del espacio-tiempo. Pero esto nos lleva a una idea aún más profunda: entrelazamiento y geometría son equivalentes. ¿Puede ocurrir que esa sea la pieza del rompecabezas que nos falta? Muchos físicos opinan que sí y en la actualidad se están llevando a cabo varios intentos para transformar esta intuición en algo más tangible.

ENTRELAZAMIENTO, INFORMACIÓN Y GRAVEDAD

Hasta el momento, se ha visto que la solución del rompecabezas que relaciona la gravedad, el espacio-tiempo y la mecánica cuántica tiene que pasar por la noción de entrelazamiento cuántico y la termodinámica. Pero ¿cómo generar el espacio-tiempo a partir de esos ingredientes? ¿Es posible empezar con una teoría cuántica y construir el resto a partir de entrelazar partículas? La respuesta es afirmativa, al menos en ciertos casos específicos.

La pieza final del rompecabezas es la información. Recordemos que el principio holográfico es una afirmación sobre la información contenida en el universo: en particular, afirma que todo lo que pasa en un cierto volumen del espacio tiene que poder ser reconstruido a partir de información localizada en su superficie. La dualidad AdS/CFT es un ejemplo concreto de esta posibilidad. No es de extrañar que la información acabe por jugar un papel esencial en la comprensión del espacio-tiempo.

¿Cómo se relaciona la información con el espacio? Para averiguarlo, nos ayudará pensar en dos regiones muy separadas en nuestro universo. Tomemos, por ejemplo, nuestra galaxia y la de Andrómeda. Sabemos que Andrómeda está muy lejos porque nos llega muy poca luz de ella: en otras palabras, es difícil de detectar a simple vista, a pesar de que está constituida por cientos de miles de millones de estrellas. Esta idea, que puede parecer un poco obvia, se puede refinar algo más: el hecho de que Andrómeda sea difícil de ver significa que tiene poca influencia en

nuestra galaxia. Es decir: si tomamos una región cualquiera de la Vía Láctea, la cantidad de sucesos que pasan debido a algo que haya sucedido en la galaxia de Andrómeda es muy limitada.

Podemos ver esto desde la perspectiva de la información. Pongamos que queremos usar información contenida en la Tierra para reconstruir la galaxia de Andrómeda en una simulación. ¿Seremos capaces de reproducirla por completo? Obviamente no: dada la potencia de nuestros telescopios, solo podremos dar una imagen muy aproximada de nuestra galaxia vecina. Será, como mucho, una reproducción borrosa del original, con muy baja resolución. A pesar de que es posible usar información situada en la Tierra para deducir ciertas características de Andrómeda, esa información es mucho menor que la que obtendría alguien que viviese en esa misma galaxia.

Por otro lado, desde la Tierra tenemos una idea bastante aproximada de lo que sucede en el Sol. Se podría decir que los sucesos en el astro rey tienen consecuencias para los habitantes de nuestro planeta y, por lo tanto, casi todo lo que pasa en él está relacionado, de una forma u otra, con lo que pasa en nuestra estrella. Volviendo a la idea de la reconstrucción, si quisiéramos crear una simulación del Sol en un ordenador, nos sería relativamente fácil dar con un modelo fidedigno o, al menos, mucho más fidedigno que el que podríamos crear de la galaxia de Andrómeda o, por poner otro ejemplo, de Próxima Centauri.

Podemos traducir todo lo que acabamos de describir al lenguaje de la información. La Tierra no es más que un conjunto de bits: de hecho, es un conjunto finito de bits, como nos enseña el principio holográfico. Tanto el Sol como la galaxia de Andrómeda son otros conjuntos de bits. En general, el universo entero no es más que una colección finita de unos y ceros.

Estos unos y ceros no existen independientemente entre sí, porque no son bits clásicos, sino bits cuánticos. Un bit cuántico, al contrario que uno clásico, admite distintas superposiciones de sus dos estados básicos. Además, es susceptible, como todo buen sistema cuántico, de ser entrelazado con otros bits cuánticos. Nos podemos preguntar ahora sobre la relación entre los bits de la Tierra y los de Andrómeda. ¿Se parecen? ¿Son

muy distintos? ¿Cuántos de los bits de Andrómeda se repiten en nuestro planeta? ¿A cuántos de nuestros bits afectan los de Andrómeda? Todas estas preguntas se pueden contestar usando un concepto llamado *información mutua*. La información mutua nos dice cuánta información sobre un sistema podemos obtener mirando a otro.

La idea se entenderá mejor pensando en dos círculos que se cortan. Si la zona común a los dos es pequeña, conocer la información contenida en uno de ellos no nos informará mucho del otro; pero si la intersección abarca buena parte de los círculos, saber de uno en buena medida será saber del otro. Cuanta más información mutua, más relacionados están ambos sistemas.

Resulta que la información mutua está relacionada, no muy sorprendentemente, con el entrelazamiento cuántico. Cuando dos sistemas tienen un alto grado de entrelazamiento, su información mutua es grande; cuando apenas están entrelazados, su información mutua es pequeña. El grado de entrelazamiento entre dos sistemas se mide utilizando algo llamado la *entropía de entrelazamiento*, que es un refinamiento de la noción clásica de entropía.

La entropía de entrelazamiento está basada en la llamada *entropía de Von Neumann*, bautizada así por ser el matemático John von Neumann (1903-1957) su inventor. La idea de Von Neumann era generalizar la noción de entropía a sistemas cuánticos, que son notablemente más difíciles de analizar debido a que su incertidumbre puede llegar de dos lados: por un lado, puede deberse a la incertidumbre intrínseca del sistema, es decir, al hecho de que una partícula pueda estar en dos estados a la vez; por el otro, puede deberse a nuestro propio desconocimiento, es decir, puede tratarse de simple falta de información. En muchos casos, ni siquiera podemos saber si la incertidumbre es de un tipo o de otro. Von Neumann encontró una forma de incorporar ambos tipos de incertidumbre a una nueva noción de entropía que reproducía los resultados de la entropía clásica, pero daba una nueva visión de lo que esta significaba para sistemas cuánticos.

La entropía de entrelazamiento está relacionada con la entropía de Von Neumann. Nos dice hasta qué punto una parte de un

sistema depende del resto. Por ejemplo, nuestro sistema puede ser una placa de metal, pero nos interesa solo fijarnos en una pequeña parte. En este caso, podemos medir su entropía de Von Neumann, ignorando el resto. La entropía que obtenemos nos da una medida de hasta qué punto depende el estado de la pequeña parte del resto del metal.

Volviendo al caso de Andrómeda y la Tierra, vemos que su información mutua o entropía de entrelazamiento tiene que ser muy pequeña: con información obtenida en la galaxia de Andrómeda es imposible reconstruir nuestro planeta. Dado que la información mutua depende del entrelazamiento, podemos deducir que esas dos regiones del espacio están poco entrelazadas. Por otro lado, el nivel de entrelazamiento entre el Sol y la Tierra es mucho mayor. De ahí, llegamos a una idea sorprendente: la cantidad de entrelazamiento entre dos regiones del espacio parece estar determinada por su distancia. Es como si la distancia y la entropía de entrelazamiento fueran dos aspectos de un mismo fenómeno.

Se trata de una revelación extraordinaria, porque la podemos considerar a la inversa: ¿y si el entrelazamiento crease el espacio y no al revés? ¿Y si todo lo que hubiese fuera información, más o menos entrelazada? Eso explicaría fenómenos como AdS/CFT, donde dos espacios con distintos números de dimensiones dan lugar a la misma física. Si todo lo que hay es información, las dimensiones del espacio son lo de menos. Podemos construir teorías con el número de dimensiones que queramos; mientras den lugar a las mismas relaciones entre información, describirán el mismo universo.

Esto coincide con otra intuición que el genial físico John Wheeler (1911-2008) tuvo hace sesenta años. Según él, el espacio-tiempo a distancias lo suficientemente cortas dejaba de parecer espacio y se convertía en lo que dio en llamar «espuma cuántica». La idea es que, a medida que nos fijamos en distancias más cortas, el principio de incertidumbre se vuelve más y más importante: si miramos el espacio a muy pequeña escala, habrá suficiente energía para crear agujeros negros. Pero eso significa que la curvatura en ese lugar será infinita, lo que da al traste con las nociones mismas de espacio y tiempo: el espacio se ensancha infinitamente y

el tiempo se para por completo. Eso tiene que pasar en cualquier lugar del universo, incluso el vacío: se mire el punto que se mire, el principio de incertidumbre acabará por dar lugar a esas violentas fluctuaciones cuánticas que destruirán cualquier apariencia de un espacio-tiempo ordenado. Así pues, nuestra idea de espacio-tiempo no puede ser fundamental, porque deja de funcionar para distancias cortas. Tiene que haber algo que lo sustituya. Ese algo, parece ser, es el entrelazamiento cuántico.

Varios físicos han tratado de generar un espacio-tiempo a partir del entrelazamiento cuántico. Sean Carroll (n. 1966) lo ha intentado en 2016, tratando de obtener un espacio-tiempo a partir de un sistema cuántico sin espacio, fijándose solo en la información mutua entre partes del sistema.

Según la mecánica cuántica, el único objeto fundamental es algo llamado un *espacio de Hilbert*. Recordemos que un espacio de Hilbert es un espacio abstracto que da cuenta de todos los posibles estados de un sistema. Es decir: en lugar de hablar de un espacio y un tiempo y de las posiciones que tienen las partículas en él, hablamos de todas las posibles configuraciones energéticas de un sistema, por ejemplo. En general, un espacio de Hilbert puede fijarse en aspectos como el momento, la energía o la posición: todas las descripciones son equivalentes y contienen la misma información. Lo que aquí es fundamental es que podemos pasar de una descripción a otra, sin que eso cambie nada sobre la información de la que disponemos. La descripción es lo de menos: lo que importa es la información en sí y el espacio de Hilbert en el que vive.

La idea de Carroll es partir del espacio de Hilbert y dividirlo en pequeños pedazos entrelazados entre sí. De ahí se puede calcular la información mutua entre dos de esos pedazos. El proceso se puede repetir tantas veces como se quiera, dividiendo un pedazo en varios más pequeños y así sucesivamente. Cada uno de esos pedazos está entrelazado con el de al lado. Por supuesto, se trata de un «al lado» metafórico, porque aún no disponemos de un espacio en el que medir distancias.

Carroll postula, aunque no demuestra, que el grado de entrelazamiento es equivalente a la distancia. Es decir: la distancia

entre dos partes del espacio de Hilbert viene dada por el grado de entrelazamiento entre estas. Una vez establecido esto, se pregunta por la geometría del espacio resultante: sorprendentemente, obtiene la de Minkowski, el espacio-tiempo de la relatividad especial.

El siguiente paso es modificar ligeramente la configuración del espacio de Hilbert, por ejemplo, añadiendo energía. Una vez hecho eso, se pregunta qué le sucede a la geometría del espacio resultante. Carroll demuestra que, cuando añadimos energía, el espacio se deforma de la misma forma que predice la relatividad general. Era de esperar: si la geometría surge del entrelazamiento entre partes del espacio de Hilbert, un cambio en la configuración de este tendría que resultar en una modificación de la geometría. Se trata de un ejemplo espectacular de la relatividad general surgiendo de una teoría cuántica, sin mención alguna a la fuerza de la gravedad o a la presencia de gravitones.

A pesar de que el modelo de Carroll reproduce ciertos aspectos de nuestro mundo, sigue siendo un intento incompleto. Por ejemplo, no incluye la evolución temporal; tampoco explica la relación entre grado de entrelazamiento y distancia. Pero profundiza sobre una idea que cada vez toma más fuerza: la gravedad y el espacio-tiempo son fenómenos emergentes de la mecánica cuántica y el entrelazamiento. Eso explicaría las tremendas dificultades para desarrollar una teoría cuántica de la gravedad: parece que la gravedad surge naturalmente de la mecánica cuántica, pero de una forma mucho más sutil de lo que nadie podría haber predicho.

REDES DE TENSORES Y HOLOGRAFÍA

La idea de Carroll se inspira en otro desarrollo reciente en holografía: unos nuevos objetos matemáticos llamados *redes de tensores*. Se trata de una técnica que se originó en la física de la materia condensada, pero que encontró una aplicación inesperada en gravedad cuántica después de que Brian Swingle, un físico de la materia condensada que decidió aprender algo de teoría de

cuerdas, se diera cuenta de que ambas disciplinas tenían mucho más en común de lo que la gente creía.

Una red de tensores es muy parecida a las redes de nuestro día a día, solo que en los nudos hay un objeto matemático llamado *tensor*. Un tensor aquí es simplemente una colección de números que describe las propiedades de un objeto.

Analizar grandes agrupaciones de partículas es algo muy complicado: de hecho, en mecánica clásica el problema de tres cuerpos en atracción mutua es insoluble. Imaginemos lo difícil que tiene que ser hacer predicción alguna sobre un pedazo de metal que contiene billones de átomos que interactúan entre sí. Las redes de tensores son una forma de simplificar los cálculos en problemas de este tipo, uniendo dos átomos contiguos en una súper-estructura que luego se une a otra a su lado, y así sucesivamente.

Para entenderlo mejor imaginemos una cadena de electrones, cada uno de los cuales puede tener espín arriba o abajo. Estos espines vienen descritos por un tensor en la posición de cada electrón. Ahora lo que hacemos es entrelazar dos átomos contiguos, de forma que podamos describir el par con un solo tensor, a un nivel más alto. Luego continuamos este proceso indefinidamente, fijándonos en detalles cada vez menos precisos del sistema, hasta condensarlo todo en un tensor final. Eso es una red de tensores.

Curiosamente, esta construcción reproduce de forma fiel una de las características de la correspondencia AdS/CFT: a pesar de que empezamos con una sola dimensión, creamos una segunda. En este caso, lo que juega el papel de segunda dimensión es el grado de fusión entre nodos en la red. Se trata de una idea parecida a la de la escala dentro de AdS: recordemos que en la frontera de la construcción AdS/CFT había una teoría CFT que contenía una dimensión menos. Sin embargo, la distorsión del espacio AdS, que hacía parecer más grandes a los objetos de cerca del centro, cumplía el papel de la que faltaba. En la red de tensores, el grado de fusión entre nodos hace exactamente lo mismo: crea una segunda dimensión donde solo había una.

Parece algo casi mágico: los físicos de cuerdas empezaron con una teoría en cinco dimensiones (cuatro espaciales) con gravedad y encontraron una con una menos que describía los mismos

fenómenos; los físicos de la materia condensada empezaron con una dimensión y descubrieron que el grado de entrelazamiento creaba una segunda. Por si fuera poco, la estructura de ese nuevo espacio es exactamente la misma que la del espacio AdS. De hecho, es una *discretización* del mismo, como si hubiéramos tomado el espacio AdS y lo hubiéramos partido en pequeños trozos indivisibles.

Lo siguiente que podemos plantearnos es si, en el caso de las redes de tensores, aparece también un análogo de la gravedad. La respuesta es afirmativa: la introducción de una segunda dimensión conlleva aparejada la aparición de efectos gravitatorios. En particular, el principio de equivalencia de Einstein surge del entrelazamiento.

Brian Swingle explica la idea de la siguiente manera: el principio de equivalencia nos dice que todos los cuerpos, sin importar su masa, sufren la misma aceleración en un campo gravitatorio. Se trata de una forma alternativa de interpretar la afirmación de que los campos gravitatorios son equivalentes a una aceleración: si este tiene que ser el caso, todo cuerpo debe sentir la misma aceleración en un campo gravitatorio. Esto nos dice que la gravedad es universal, porque afecta a todas las partículas por igual, sean electrones, neutrones o fotones. El entrelazamiento es también universal, porque puede unir partículas de cualquier tipo. Un electrón puede estar entrelazado con un fotón o un neutrón. Da lo mismo: el entrelazamiento no distingue entre partículas. Tanto este como la gravedad son fenómenos comunes a todas las partículas del universo.

Los desarrollos en redes de tensores no son un caso aislado. Los últimos años han visto un hervidero de nuevas ideas motivadas, en gran parte, por el principio holográfico y la dualidad AdS/CFT. Los cálculos son cada vez más precisos y las ideas se vuelven cada vez más claras. En 2006, Shinsei Ryu y Tadashi Takayanagi mostraron que era posible derivar una versión rudimentaria de las ecuaciones de Einstein a partir de la entropía de entrelazamiento y la holografía. Ha habido decenas de resultados como este que, poco a poco, han ido empujando el campo hasta la situación en la que nos encontramos ahora. La unifica-

ción de la mecánica cuántica y la relatividad general está más cerca que nunca.

EL FUTURO

En 2016, durante la conferencia sobre teoría de cuerdas celebrada en la universidad Tsinghua, en Pekín, Maldacena resumía la situación actual. Su discurso hacía referencia a la entropía de entrelazamiento, las redes de tensores y una miríada de resultados recientes en gravedad cuántica. La impresión es que estamos cerca de un salto cualitativo, motivado por un sinnúmero de pequeños avances que se alimentan los unos de los otros, perfilando una visión que se vuelve más nítida de forma casi imperceptible pero imparable. Así avanza la ciencia: a base de pequeños pasos, de complicados cálculos realizados por distintos grupos de investigadores, que luego son usados como punto de partida por otros, refinando constantemente las ideas, penetrando cada vez más hondo en la naturaleza de la realidad.

Hace veinte años, cuando Maldacena demostró la dualidad AdS/CFT, solo había una intuición poderosa: que el espacio y el tiempo debían de surgir de algo distinto y que la clave estaba en el entrelazamiento y en la información. Hoy, esa intuición ha cobrado vida y estamos más cerca de ser capaces de averiguar de dónde surgen el espacio y el tiempo. De hecho, existen ya modelos de donde emergen ambos: el problema es dar con uno que dé lugar a nuestro universo, en lugar de a algo relativamente parecido.

Queda mucho por hacer, pero la meta ya se vislumbra. El espacio y el tiempo, antaño categorías fundamentales de nuestra experiencia, están a punto de perder su estatus como pilares del universo y ceder el puesto al nuevo rey, la información cuántica. Considerado antes como pura especulación, el principio holográfico pronto ocupará su lugar como el inspirador de la física del mañana.

- BARTUSIAK, M., *Agujeros negros*, Barcelona, Ariel, 2016.
- DEUTSCH, D., *La estructura de la realidad*, Barcelona, Anagrama, 2002.
- FERNÁNDEZ, J.L., *Los agujeros negros*, Madrid, CSIC/Los Libros de La Catarata, 2014.
- FEYNMAN, R., *Electrodinámica cuántica: la extraña teoría de la luz y la materia*, Madrid, Alianza Editorial, 2004.
- GREENE, B., *El universo elegante. Supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de la teoría definitiva*, Barcelona, Editorial Crítica, 2014.
- HAWKING, S., *Los sueños de los que está hecha la materia*, Barcelona, Editorial Crítica, 2014.
- JOU, D., *Introducción al mundo cuántico*, Barcelona, Pasado y Presente, 2013.
- SUSSKIND, L., *La guerra de los agujeros negros*, Barcelona, Editorial Crítica, 2013.
- 'T HOOFT, G., *Partículas elementales*, Barcelona, Planeta, 2013.
- THORNE, K.S., *Agujeros negros y tiempo curvo*, Barcelona, Editorial Crítica, 2010.

WEINBERG, S., *El sueño de una teoría final. La búsqueda de las leyes fundamentales de la naturaleza*, Barcelona, Editorial Crítica, 2010.

ÍNDICE

- AdS/CFT, correspondencia 111-121, 145, 148, 151-153
- agujero
de gusano 12, 90, 136, 137, 141-144
negro 10, 29, 32, 36-48, 54, 60, 64-72, 73-85, 88-96, 97, 100, 101, 106-108, 115, 118, 130, 137-144
negro de Kerr 48
negro de Reissner-Nördstrom 48, 115
- Anti-de Sitter, espacio (AdS) 112-115
- Bekenstein, Jacob 8, 9, 16, 64, 70-78, 100, 130, 132
- Big Bang 86
- Boltzmann, Ludwig 53
- Bose-Einstein, condensado de 121
- browniano, movimiento 125, 126, 127
- Carroll, Sean 149
- causalidad 134, 135, 141
- Chandrasekhar, Subrahmanyan 37
- cinética, energía 53
- compactificación 108
- complementariedad, principio de 36, 92, 95, 96, 99, 116, 117
- conforme de campos, teoría 117, 120, 121
- cuántica
cromodinámica 111, 114, 117, 119, 120
de campos, teoría 11, 21, 27, 78, 80, 102-104, 114, 115, 117, 118
mecánica 8, 11-13, 15, 20, 24-30, 48, 54, 64-66, 69, 75, 78, 83, 92, 96, 99, 103, 109, 116, 123, 132-134, 142, 149, 153
- cuántico, entrelazamiento 12, 89, 133-136, 141, 144-153

cuantización 27
 cuerda
 abierta 109, 111
 cerrada 111
 fundamental 105, 106, 144
 cuerpo negro, radiación de 81, 82, 85
 curvatura 16, 20, 22, 39-41, 44, 47, 79, 142, 148

 Davies, Paul 79, 80
 D-brana 108-111
 determinista, teoría 25, 62, 64, 90, 96
 dilatación temporal 35, 36, 93, 95
 dual, espacio 117
 dualidad 26, 36, 117-121, 145, 152, 153

 Einstein, Albert 7, 10, 11, 13, 16-18, 20, 24, 28, 33, 37, 40, 42, 66, 70, 72, 76, 82, 94, 121, 131, 133, 134, 136, 137, 141, 144, 152
 electrodébil, teoría 114
 electrón 8, 21, 24, 27, 37, 38, 48, 65, 71, 94, 102, 103, 105, 119, 133, 151, 152
 enana blanca 38, 133
 entropía 8, 9, 49-60, 63, 64, 66, 69-72, 74-78, 83, 100, 101, 106, 108, 110, 125, 128, 130, 132, 144, 147, 148, 152, 153
 de entrelazamiento 147, 148
 entrópica
 fuerza 125, 129
 gravedad 128
 equivalencia, principio de 16, 18, 19, 39-42, 79, 82, 91, 92, 152
 ER=EPR 144
 espacio-tiempo 9, 10, 12, 16, 20, 22, 23, 28, 33, 39, 40, 43, 44, 46-48, 67, 78, 86, 87-89, 91, 112, 114, 115, 123, 138, 140, 141, 144, 145, 148, 150
 espín 38, 133, 134, 136, 151
 estrella de neutrones 37

 fases, espacio de 60-64
 fotón 21, 24, 34, 71, 73, 76, 78, 87, 103, 105, 119, 135, 152
 Fulling, Stephen 79, 80

 geodésica 20, 22-23, 86, 87, 112
 gravitón 16, 24, 25, 104, 107, 109, 150

 Hawking, Stephen 8, 9, 16, 69, 70, 72, 74, 77-86, 88, 95, 96, 99, 107, 108, 121, 132, 144
 radiación de 83-86, 95, 96, 107, 121, 144
 Hilbert, espacio de 26, 64, 149, 150
 holográfico, principio 9-12, 16, 30, 36, 42, 46, 48, 49, 54, 60, 70, 89, 97, 102, 105, 106, 108, 111, 114, 117, 121-123, 131, 132, 145, 146, 152, 153
 horizonte de sucesos 29, 34, 36, 37, 40, 42, 43, 46, 47, 60, 70-72, 77-82, 85, 88-95, 99, 100, 106, 121, 130, 138-140, 144

 indeterminación, principio de 25, 26, 105, 116, 119,
 información 7, 9-11, 16, 26, 30, 37, 43, 46, 48, 49, 56-61, 63-66, 69, 70, 72, 75, 77, 78, 81, 83, 84, 86, 88, 90-93, 95-97, 99, 100-102, 106, 112, 115-118, 130, 131, 133, 134, 136, 141, 145-149, 153
 mutua 147-149

Koelmann, Johannes 128

Liouville, teorema de 61, 62,

Maldacena, Juan 10-13, 113, 114-120, 123, 125, 133, 141, 144, 153

marea, fuerzas de 17, 42, 92

masa y energía, equivalencia entre 71-73, 76, 82

Mikado, universo 128, 129

Minkowski, espacio-tiempo de 44, 79, 80, 86, 88, 114, 150

no borrado, teorema de 64, 66

no clonación, teorema de 65

onda

función de 26, 27, 64, 66, 92

longitud de 26, 36, 71, 76, 83

Pauli, principio de exclusión de 38, 133

Penrose, diagrama de 86-90, 137, 140

perturbaciones, teoría de 120

Planck, Max 75

área de 71, 75, 77, 116

constante reducida de 38, 85

longitud de 75, 94, 102

plasma 94, 97

Polchinski, Joseph 108

presión de degeneración electrónica 37, 38

quarks-gluones, plasma de 120

relatividad general 7, 8, 10, 11, 13, 15, 16, 20, 22, 24, 25, 28, 33, 34, 39, 40, 42, 44, 45, 48, 54, 66, 69, 71, 73, 78, 88, 91, 99, 131, 142, 144, 150, 153

renormalización 35, 103, 103

Schwarzschild, Karl 33

ecuaciones, métrica o acción de 33, 34, 36, 37, 73, 78, 107, 140

radio de 34

angularidad 40-43, 45, 46, 48, 78, 79, 84, 88-93, 95, 140, 141

Smolin, Lee 86

Steinhauer, Jeff 121

superconductor 129

Susskind, Leonard 11, 12, 39, 46, 84, 92, 95, 97, 100, 103, 109, 112, 133, 141, 144

Swingle, Brian 150, 152

't Hooft, Gerardus 84, 92, 97

tensor 151

tensores, red de 150, 153

termodinámica, segunda ley de la 8, 11, 51, 52, 54, 86, 64, 69, 70, 99, 110, 128, 131

unitariedad 64, 66, 83

universo-bebé 86

Unruh, W.G. 79, 80

velocidad de escape 73

Verlinde, Erik 11, 125, 128, 130-132

virtual, partícula 24, 81, 85, 143

Von Neumann, John 147
 entropía de 147, 148

Wheeler, John 148

Woit, Peter 131

El universo holográfico

¿Cuánta información cabe en una caja? El sentido común nos dice que depende de su volumen; sin embargo, desarrollos recientes en física teórica apuntan a la posibilidad de que, en realidad, dependa solo de su superficie. A esta hipótesis se la llama «principio holográfico» y predice que nuestro universo se comporta como un holograma: toda la información necesaria para describirlo está contenida en la superficie que lo envuelve. El principio holográfico surge de la incómoda unión de la relatividad general y la mecánica cuántica al estudiar las propiedades de los agujeros negros.

Eduardo Arroyo es físico, escritor y divulgador científico.